

UNIVERSITÉ DE GENÈVE

Département de minéralogie et géophysique

Centre interfacultaire de calcul électronique

FACULTÉ DES SCIENCES

Professeur C. Meyer de Stadelhofen

Université de Lausanne

Professeur B. Levrat

ÉLABORATION D'UN SYSTÈME DE TRAITEMENT GRAVIMÉTRIQUE GÉRÉ PAR L'ORDINATEUR

Etude gravimétrique du plateau romand de Versoix (GE) à Concise (VD)

THÈSE

présentée à la Faculté des sciences
de l'Université de Genève
pour obtenir le grade
de docteur ès sciences géophysiques

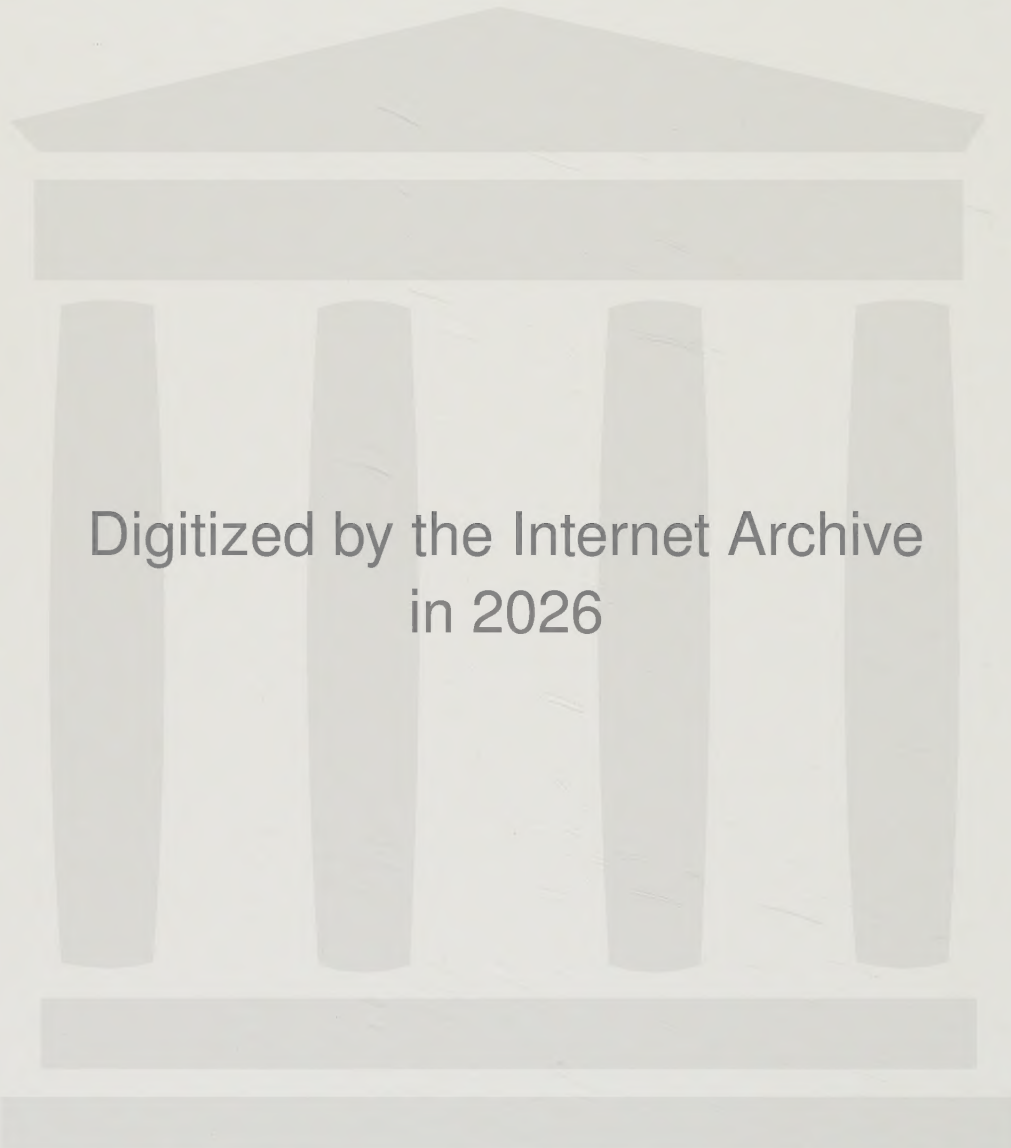
par
Raymond OLIVIER
de Carouge (GE) et Eysins, Crans et La Sarraz (VD)

Thèse N° 1606

Texte condensé de la thèse N° 1606, approuvée par la Faculté des sciences. Des copies en microfilms du texte complet peuvent être obtenues auprès de la Bibliothèque publique et universitaire de Genève. Le texte complet peut être consulté à cette bibliothèque ou à la Bibliothèque nationale suisse à Berne.

Genève
Blanc-Wittwer S.A.

1974



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545902_0016

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
Département de minéralogie et géophysique
Centre interfacultaire de calcul électronique

FACULTÉ DES SCIENCES
Professeur C. Meyer de Stadelhofen
Université de Lausanne
Professeur B. Levrat

ÉLABORATION D'UN SYSTÈME DE TRAITEMENT GRAVIMÉTRIQUE GÉRÉ PAR L'ORDINATEUR

Etude gravimétrique du plateau romand de Versoix (GE) à Concise (VD)

THÈSE

présentée à la Faculté des sciences
de l'Université de Genève
pour obtenir le grade
de docteur ès sciences géophysiques

par
Raymond OLIVIER
de Carouge (GE) et Eysins, Crans et La Sarraz (VD)

Thèse N° 1606

Texte condensé de la thèse N° 1606, approuvée par la Faculté des sciences. Des copies en microfilms du texte complet peuvent être obtenues auprès de la Bibliothèque publique et universitaire de Genève. Le texte complet peut être consulté à cette bibliothèque ou à la Bibliothèque nationale suisse à Berne.

Genève
Blanc-Wittwer S.A.
1974

La faculté des sciences, sur le préavis du professeur Camille MEYER DE STADELHOFEN, directeur scientifique (Université de Lausanne) et le professeur Bernard LEVRAT, autorise l'impression de la présente thèse, sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont énoncées.

Genève, le 9 novembre 1972

Le Doyen: Jean MULLER

Thèse N° 1606



Je dédie ce travail à mes parents et à mon épouse.

CHAPITRE I : INTRODUCTION	1
1.1. Contexte de la recherche	1
1.2. Problématique	2
1.3. Objectifs de la recherche	3
1.4. Méthodologie	4
1.5. Organisation du travail	5
CHAPITRE II : REVUE DE LITTÉRATURE	10
2.1. Définitions et concepts clés	10
2.2. Évolution des théories	15
2.3. Synthèse des travaux antérieurs	20
2.4. Identification des lacunes	25
CHAPITRE III : MÉTHODOLOGIE	30
3.1. Approche méthodologique	30
3.2. Échantillon	35
3.3. Instruments de mesure	40
3.4. Procédure de collecte des données	45
3.5. Analyse des données	50
CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION	55
4.1. Présentation des résultats	55
4.2. Interprétation des résultats	60
4.3. Discussion	65
4.4. Implications pratiques	70
4.5. Limites de l'étude	75
CHAPITRE V : CONCLUSION	80
5.1. Synthèse des conclusions	80
5.2. Perspectives de recherche	85
5.3. Recommandations	90

AVANT-PROPOS

Ce travail est le fruit d'une collaboration étroite entre la géophysique appliquée et l'informatique.

Dès le début de mes études de doctorat, l'utilisation de l'informatique en géophysique devint la motivation essentielle de mon activité.

Je dois cette stimulation à mon frère aîné, Jean-Claude, Dr. ès sciences physiques, qui m'initia aux rudiments de l'informatique.

C'est sur les conseils avisés de M. le Professeur C. MEYER DE STADELHOFEN, directeur de l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne et ex-directeur de l'Institut de Géophysique à Genève, que ce travail a pu être mené à chef. Il m'a initié à l'art de la géophysique appliquée et a éveillé en moi le rôle pragmatique et réaliste du travail du géophysicien. Je le remercie vivement pour toute la bienveillance et la confiance qu'il a témoignées à mon égard durant près de cinq années.

D'autre part, mes sincères remerciements vont à M. le Professeur B. LEVRAT, directeur de l'Institut Interfacultaire de Calcul Electronique de l'Université de Genève, dont j'ai été l'un de ses assistants et qui a dirigé la partie informatique de mon travail tout au long de ces années. Son enseignement et son expérience m'ont permis d'orienter mes études vers l'informatique. Je le remercie en outre d'avoir accepté de faire partie du jury de thèse.

TABLE DES MATIÈRES

	page
AVANT-PROPOS	4
CHAPITRE 1 <i>Introduction</i>	
1.1. Projet d'études synthétiques à l'aide de cartes d'isoprobabilités ...	7
CHAPITRE 2 <i>La gravimétrie et l'ordinateur</i>	
2.1. Rappel des principes de la gravimétrie	8
2.2. L'interprétation qualitative des anomalies gravifiques	8
2.3. La place de l'ordinateur	9
CHAPITRE 3 <i>L'établissement de la correction topographique</i>	
3.1. Généralités	10
3.2. L'aspect théorique	11
CHAPITRE 4 <i>La digitalisation des modèles topographiques</i>	
4.1. Généralités	13
4.2. La zone A, ou zone de terrain	13
4.3. La zone B, ou zone proche	13
4.3.1 L'acquisition des données	15
4.3.2 L'établissement et mise à jour du fichier RELIEF	15
4.4. Les zones C et D, ou zones lointaines	17
CHAPITRE 5 <i>Vers un système de traitement gravimétrique géré par l'ordinateur</i>	
5.1. La carte gravimétrique à grande échelle	22
5.2. L'historique des études gravimétriques romandes	22
5.3. L'assemblage et l'harmonisation de la mosaïque gravimétrique romande	24
5.4. La nécessité d'un système de traitement géré par l'ordinateur	24
CHAPITRE 6 <i>L'établissement des mesures</i>	
6.1. Le raccordement des réseaux de bases	25
6.2. La précision des résultats anciens	25
6.3. Les caractéristiques principales des études anciennes et nouvelles	25
6.4. Les densités choisies	27
CHAPITRE 7 <i>Présentation du système de traitement géré par l'ordinateur</i>	
7.1. Généralités	28
7.2. L'acquisition des données	28
7.3. La constitution du fichier définitif des données gravimétriques	30
7.4. Le calcul de la correction topographique	30
7.4.1 La correction topographique proche	30
7.4.2 La correction topographique lointaine	34
7.5. L'élaboration des anomalies de BOUGUER	34
CHAPITRE 8 <i>La représentation des résultats</i>	
8.1. Généralités	38
8.2. La base géographique	38
8.3. Le relevé graphique des résultats	38
8.4. Le traçage des iso-lignes	39

CHAPITRE 9	<i>La présentation des résultats</i>	
9.1.	Gravimétrie et hydrologie	41
9.2.	L'examen des anomalies de BOUGUER	41
9.3.	Les cartes d'anomalies résiduelles	41
9.4.	Les principales anomalies d'origine superficielle	46
CONCLUSION		54
BIBLIOGRAPHIE		55

1.1. PROJET D'ÉTUDES SYNTHÉTIQUES A L'AIDE DE CARTES D'ISOPROBABILITÉS

La recherche et la protection de l'eau sont devenues, même sous nos latitudes, les préoccupations majeures des pouvoirs publics. Il faut de plus en plus de grands débits pour satisfaire les agglomérations en voie d'urbanisation et d'industrialisation.

Désormais, l'art du sourcier ne suffit certes plus; il s'est vu remplacé par bon nombre de méthodes scientifiques pas toujours coordonnées entre elles. Ces méthodes utilisent toutes un langage qui leur est propre et qui demeure souvent accessible aux seuls spécialistes.

Il est difficile aux utilisateurs, aux pouvoirs publics en particulier, de s'initier aux nombreuses techniques utilisées pour la recherche d'une nappe d'eau souterraine. En effet, dans une même région peuvent se succéder:

- l'hydrologue qui établit le bilan de l'eau reçue et restituée par un territoire donné,
- le géomorphologue qui, grâce à la morphométrie, apporte des informations précieuses tant à l'hydrologue qu'au géologue,
- le géologue qui, grâce aux observations de surface, cherche à prévoir la position et l'extension des roches réservoirs,
- le géophysicien qui perfectionne le modèle du géologue grâce à des mesures faites à distance.

Idéalement toutes ces études doivent être synthétisées par l'utilisateur mais cette synthèse est souvent, pour ce dernier, difficile voire même impossible.

C'est pour cette raison que nous avons fixé, comme premier but à notre travail, l'établissement de cartes des probabilités de trouver de l'eau. Pour établir ces cartes nous aurions fait appel à toutes les informations fournies par les divers spécialistes (Biblio. No 17). Très vite nous nous sommes rendu compte que, pour l'instant, le but que nous nous proposons reste hors de portée. Même en admettant résolus les divers problèmes de pondération des résultats, d'origine, de nature et de précision diverses, force nous a été de constater que les données nécessaires n'ont pas toutes été collectées jusqu'ici.

Grâce aux Instituts de Géologie et de Géophysique de l'Université de Lausanne, grâce aussi au Bureau vaudois de l'aménagement du territoire, nous possédions une bonne information concernant l'hydrologie, la géologie et les résistivités électriques des terrains qui nous intéressent. Par contre, les données morphométriques manquaient et les données gravimétriques restaient disparates et partielles.

C'est pour ces raisons que nous avons provisoirement abandonné notre but initial, soit l'établissement de cartes de probabilités, pour concentrer notre effort sur la morphométrie et la gravimétrie.

2.1. RAPPEL DES PRINCIPES DE LA GRAVIMÉTRIE

La gravimétrie prétend apporter des informations sur la nature et l'architecture du sous-sol grâce à l'étude des variations locales de l'accélération de la pesanteur.

Ces variations peuvent avoir plusieurs causes qui sont:

- l'altitude du point de mesure,
- la forme du géoïde,
- le relief topographique au voisinage du point de mesure,
- les hétérogénéités du sous-sol.

Pratiquement, la méthode consiste à se donner un modèle simple du globe terrestre, à calculer la gravité à la surface de celui-ci et enfin à comparer cette gravité théorique avec celle mesurée dans la réalité.

L'écart entre la valeur théorique et la valeur mesurée est appelée l'ANOMALIE DE BOUGUER; elle est due aux hétérogénéités du sous-sol.

$$\text{Anomalie de BOUGUER} = G \text{ mesuré} - G \text{ théorique} \pm \text{corrections.}$$

Le G théorique ne pose pas de problème pour nous, sa valeur étant arbitrairement fixée à:

$$G_{TH} = 978,0490 \cdot (1 + 0,0052884 \cdot \sin^2 \phi - 0,0000059 \cdot \sin^2 2\phi) \text{ Gals}$$

Les corrections, au nombre de trois, sont elles plus complexes.

La correction d'altitude vaut:

$$G_{AL} = -0,3086 \cdot Z - 0,00023 \cdot Z \cdot \cos 2\phi + 0,0007254 \cdot Z^2 \text{ Mgl}$$

La correction de plateau fait intervenir la densité des roches du sous-sol, elle vaut:

$$G_{PL} = 0,0419 \cdot Z \cdot \rho \text{ Mgl}$$

où ϕ = latitude, Z = altitude, ρ = densité.

Mais c'est la correction topographique qui pose le plus de problèmes. Destinée à annuler l'effet du relief sur les valeurs de la pesanteur mesurées en chaque station, elle nécessite une connaissance précise de ce relief et de la densité des roches qui le constituent.

Au cours de notre travail, nous avons consacré une attention toute particulière à l'élaboration de méthodes qui doivent permettre d'améliorer les corrections topographiques et de les rendre moins fastidieuses.

2.2. L'INTERPRÉTATION QUALITATIVE DES ANOMALIES GRAVIFIQUES

Ce n'est pas une, mais diverses anomalies de BOUGUER que l'on peut obtenir pour une région donnée et cela ne fut-ce qu'en faisant varier les densités choisies pour les diverses corrections.

Ceci admis, on peut dire que l'anomalie de BOUGUER est la résultante de diverses anomalies dues à plusieurs causes plus ou moins superposées. C'est l'art délicat de l'interprète que de dissocier l'anomalie de BOUGUER en ses multiples composantes pour en déduire la forme et la position des masses constituant le sous-sol, c'est-à-dire pour en déduire la structure géologique en profondeurs.

La lecture d'une carte de BOUGUER (A_B) nous montre que l'effet régional (A_R) est marqué par des anomalies à larges rayons de courbure qui correspondent généralement aux effets des structures importantes et profondes.

Il est alors facile de dégager la notion d'anomalie gravifique résiduelle (A_{RES}) par la relation

$$A_{RES} = A_B - A_R$$

En ce qui concerne le choix et le calcul des régionales ou des effets régionaux et, par conséquent des résiduelles, nous disposons de nombreuses méthodes qui vont des méthodes graphiques (smoothing) à celles dites objectives établies par analyses numériques (Fourier, polynômes, filtrages, etc.) (Biblio. Nos 5 - 11 et 23).

2.3. LA PLACE DE L'ORDINATEUR

Lors de l'interprétation, un certain nombre de méthodes simples, dites de terrain, restent extrêmement précieuses pour le géophysicien. Cependant l'ordinateur et ses énormes capacités ne peuvent plus être ignorés par le chercheur. Pour le gravimétricien en particulier, l'ordinateur est devenu un auxiliaire indispensable car il permet d'améliorer, et de beaucoup, les méthodes d'interprétation sans alourdir le travail.

La rapidité et la fiabilité des calculatrices modernes ne dispensent pas, cela va sans dire, le responsable d'une recherche gravimétrique de passer ses résultats partiels et finaux au crible du bon sens. Bien au contraire, la rapidité de l'ordinateur, la multiplicité des solutions qu'il peut fournir, exigent de l'utilisateur une culture et des efforts accrus car lui seul est à même de juger de la qualité géologique des résultats qu'il obtient.

3.1. GÉNÉRALITÉS

La méthode classique des couronnes de Hayford nécessite le calcul de l'altitude moyenne de chaque secteur topographique d'une configuration de couronnes donnée et, ensuite, celui de l'attraction de gravité totale par la relation:

$$G_{\text{TOPO}} = -\beta \cdot G \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M(i)} r_{i+1} - r_i + (r_i^2 + e_{ij}^2)^{\frac{1}{2}} - (r_{i+1}^2 + e_{ij}^2)^{\frac{1}{2}}$$

où β = coefficient angulaire, G = Cte de gravitation, ρ = densité, N = nombre de couronnes, M = nombre de secteurs par couronne, r = rayon des couronnes et e = écart moyen d'altitude entre l'altitude de la station et du secteur considéré (ij).

Le relevé des altitudes topographiques moyennes dans chaque secteur est long et fastidieux. Or, il est évident que si les stations de mesures ne sont pas très distantes les unes des autres, quelques kilomètres par exemple, ce relevé des altitudes ne se fera pas une mais n fois pour une région donnée. En fait, ce relevé se fera autant de fois qu'il existe de stations de mesures voisines, puisque chaque station nécessite ses propres corrections (fig. 1).

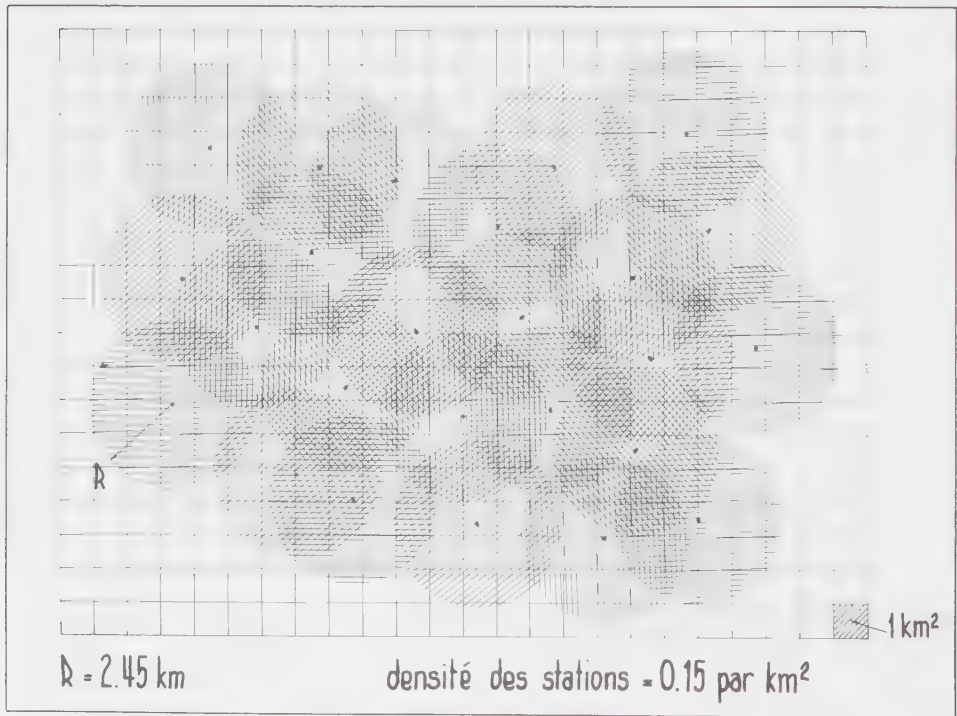


Fig. 1 Schéma des zones recouvrantes.

Pour éviter cette redondance nous avons procédé une fois pour toute à la digitalisation de tout le relief de la région étudiée, établissant ainsi des modèles topographiques indépendants

des stations de mesures. Après quoi nous avons développé un mode de traitement numérique du relief autour de chaque station. Ce traitement implique une subdivision en quatre zones.

3.2. L'ASPECT THÉORIQUE

Nous avons utilisé deux méthodes; l'une pour les deux premières zones, l'autre pour les deux suivantes. Les deux premières zones A et B s'étendent, respectivement, de 0 à 20 mètres et de 20 à 2450 mètres de la station (fig. 2).

Pour ces deux zones la méthode de calcul est celle des couronnes, dont nous avons donné plus haut l'expression mathématique. Le nombre des couronnes et des secteurs sont choisis par l'utilisateur; ainsi cette méthode n'est plus liée aux limites arbitraires des zones de Hayford. Dans ce cas, le calcul sur ordinateur s'est simplement substitué au calcul normal. Il est alimenté par les données rassemblées lors de la digitalisation de haute résolution du relief des deux premières zones.

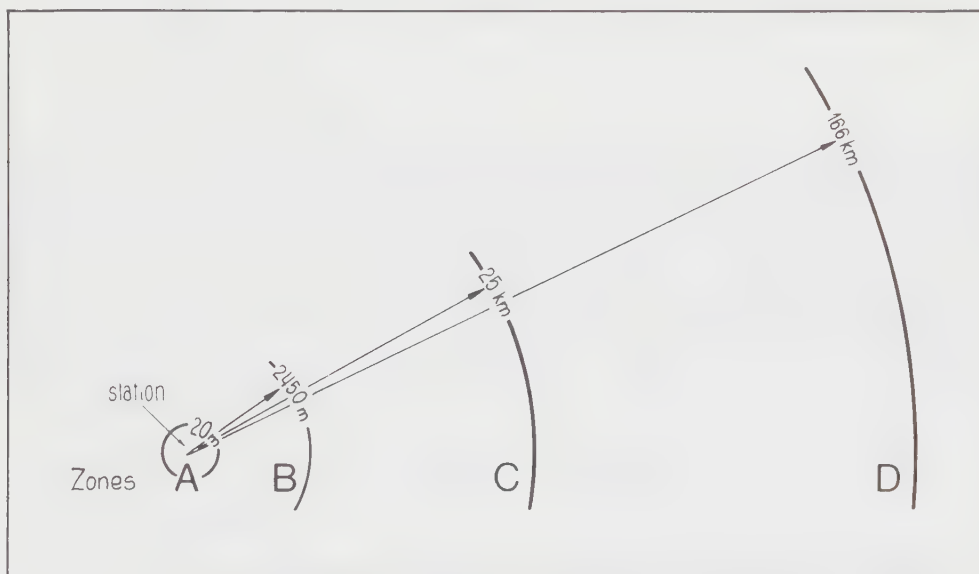


Fig. 2 Schéma des quatre zones des modèles topographiques.

La seconde méthode utilisée est celle des lignes de masse. Elle s'applique aux deux zones externes C et D qui s'étendent de 2450 mètres à 25 kilomètres et de 25 kilomètres à 166 kilomètres de la station de mesure (fig. 2).

La méthode des lignes de masse fournit une bonne approximation de l'effet gravifique de la topographie. Elle consiste à substituer au relief des prismes droits et de section carrée. On admet que la masse de tels prismes est concentrée sur une droite verticale passant par leur centre (fig. 3).

$$g_{\text{prisme}} = G \cdot \rho \cdot S \cdot \left\{ \frac{1}{r} - \frac{1}{(r + h)^{\frac{1}{2}}} \right\}$$

où S = la section du prisme, r = distance horizontale du centre du prisme à la station de mesure, h = hauteur du prisme, ρ = densité.

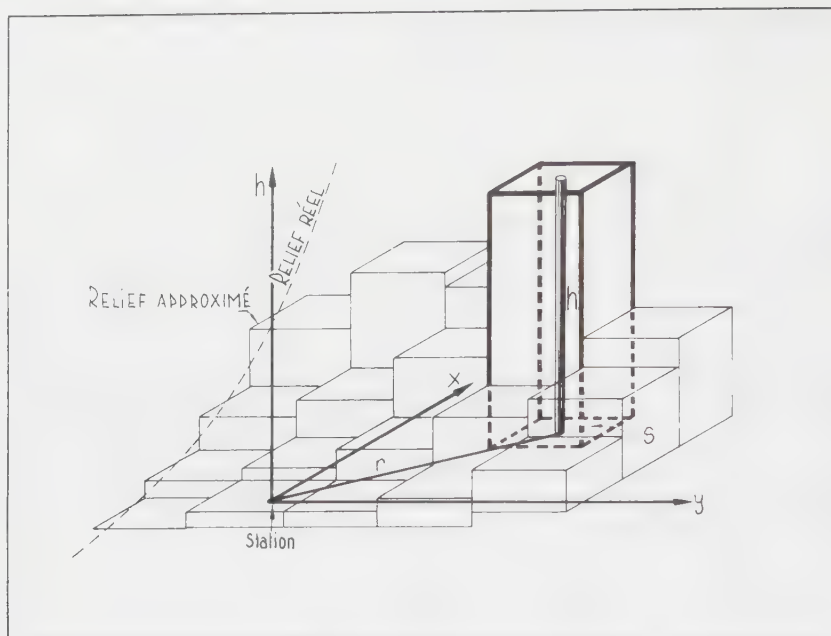


Fig. 3 Attraction gravifique par la méthode de la ligne de masse.

Le programme de calcul qui rend cette méthode utilisable a été mis au point par Monsieur D. PLOUFF du Service géologique des Etats Unis. Nous l'avons adapté à nos propres besoins.

4.1. GÉNÉRALITÉS

Comme nous l'avons vu, l'élaboration d'un levé gravimétrique de quelque importance rend presque indispensable la digitalisation de tout le relief du territoire étudié, c'est-à-dire la traduction des cartes conventionnelles en valeurs numériques remplaçant en tous points les courbes de niveau. La création, la mise à jour et le traitement de tels modèles topographiques digitaux rend nécessaire l'emploi d'un ordinateur.

Le territoire étudié peut être divisé en zones qui fournissent des modèles topographiques différents, c'est-à-dire digitalisés avec des précisions diverses selon l'importance de leur apport à la correction topographique globale (GTOPO).

4.2. LA ZONE A OU ZONE DE TERRAIN

Ce modèle doit être précis car l'effet du relief est d'autant plus grand qu'il est proche de la station de mesure. Or, cette première zone s'étend de 0 à 20 mètres autour de la station. La digitalisation est effectuée sur le terrain. L'opérateur estime, à 5 cm. près, à l'aide d'une mire et d'une nivelle, les écarts d'altitude moyens de 8 secteurs répartis en deux couronnes. Ces écarts ont pour référence l'altitude de la station. Ils sont directement notés sur le revers du protocole cadastral du repère de triangulation de 3ème ordre de référence (fig. 4) et ils constituent l'ensemble des données topographiques. La digitalisation de la zone A est la seule qui dépende de l'emplacement de la station de mesure.

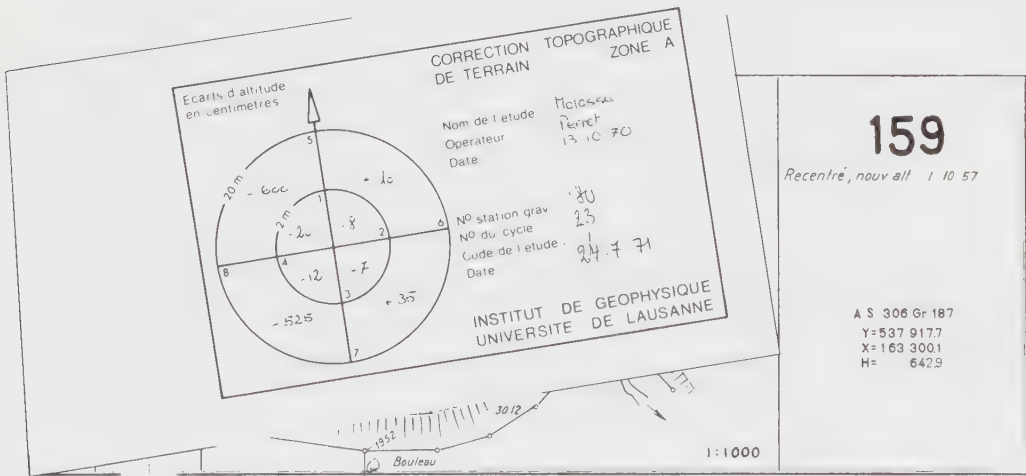


Fig. 4 Protocole cadastral et acquisition des données topographiques.

4.3. LA ZONE B OU ZONE PROCHE

Dans ce cas, les modèles digitaux sont constitués en laboratoire sur la base de cartes topographiques à l'échelle 1 : 10.000 et 1 : 25.000.

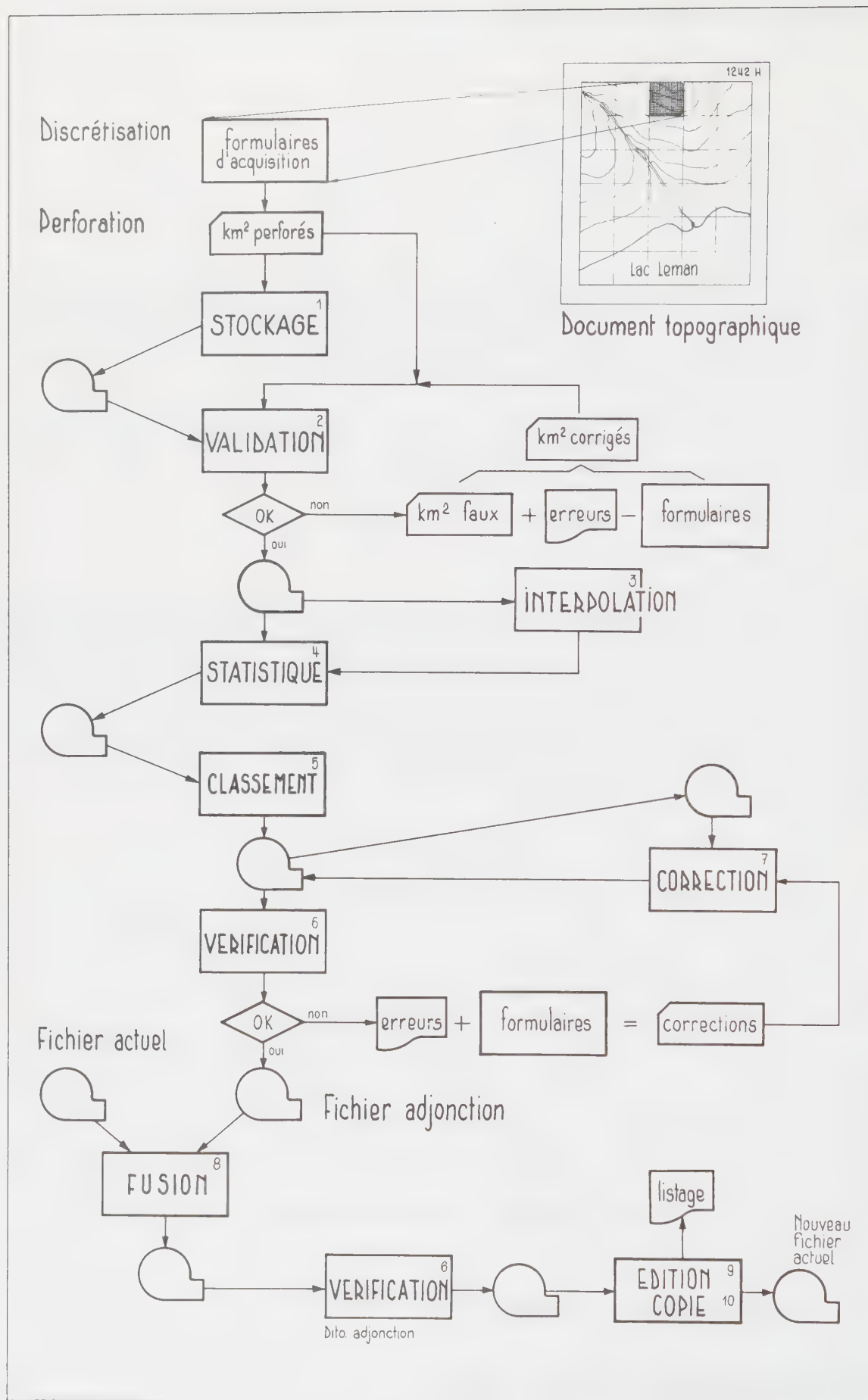


Fig. 5 Schéma du traitement de la création et de la mise à jour du fichier RELIEF.

Nous avons vu, dans notre introduction, que la géomorphométrie contribue à une meilleure interprétation synthétique des documents géologiques et géophysiques. C'est pourquoi les caractéristiques de la digitalisation ont été déterminées aussi bien par des considérations d'ordre gravimétrique que d'ordre géomorphométrique.

4.3.1. L'ACQUISITION DES DONNÉES

Le relevé des altitudes, lors de la digitalisation, se fait par "km²". Chaque "km²" est considéré comme une entité et est indépendant de ses voisins jusqu'à son utilisation ultérieure dans le cadre d'un travail donné. Ce principe a été établi pour assurer une certaine souplesse dans toutes les opérations de création et de mise à jour du fichier RELIEF.

L'estimation du relief dans chaque "km²" est effectuée selon une grille à mailles carrées, de 50 mètres de côté, définissant ainsi 400 intersections. A chaque intersection on relève l'altitude; l'erreur tolérée est de 3 mètres au maximum. La durée d'un tel travail est inférieure à une heure pour un "km²" (Biblio. No 18).

4.3.2. ÉTABLISSEMENT ET MISE A JOUR DU FICHIER RELIEF

Les données numériques relevées sur la carte topographique passent au formulaire d'acquisition, puis de celui-ci à la carte perforée, enfin de cette carte à la bande magnétique.

Tout ce processus doit rester extrêmement ouvert pour permettre l'introduction de nouvelles données et l'utilisation à chaque instant de n'importe quelle partie du fichier.

Les principales étapes nécessaires à l'élaboration du fichier relief sont les suivantes (voir fig. 5):

Discrétisation:

1. L'acquisition de l'information topographique par la discrétisation du relief sur les formulaires de données à partir des documents topographiques au 1 : 10.000, 1 : 20.000 et 1 : 25.000.
2. La vérification des formulaires et leur correction.

Mécanographie:

3. La perforation des altitudes des "km²" en cartes mécanographiques.

Création du fichier ADJONCTION:

4. Ecriture sur bande magnétique des "km²" perforés.
5. Validation et correction des "km²" écrits sur bande.
6. Interpolation pour la normalisation des km 11 x 11 ou 20 x 20.
7. Classement des "km²" selon les coordonnées repérés dans l'ordre ascendant.
8. Calculs des différents éléments statistiques et géomorphométriques propres à chaque "km²".
9. Vérification et correction de la localisation des "km²".

Mise à jour du fichier RELIEF:

10. Fusion du fichier ADJONCTION et du fichier ACTUEL.
11. Vérification et correction de la localisation des "km²".
12. Duplication du NOUVEAU fichier (copie de la bande) et établissement de l'impression par section de l'information du relief.

Les opérations 4 et 12 ont été effectuées par l'ordinateur CDC 3800 du Centre Cantonal d'Informatique de Genève, à l'aide d'une série de programmes FORTRAN IV.

Actuellement, plus de 4.000 "km²" ont été digitalisés en pays romand (voir fig. 6).

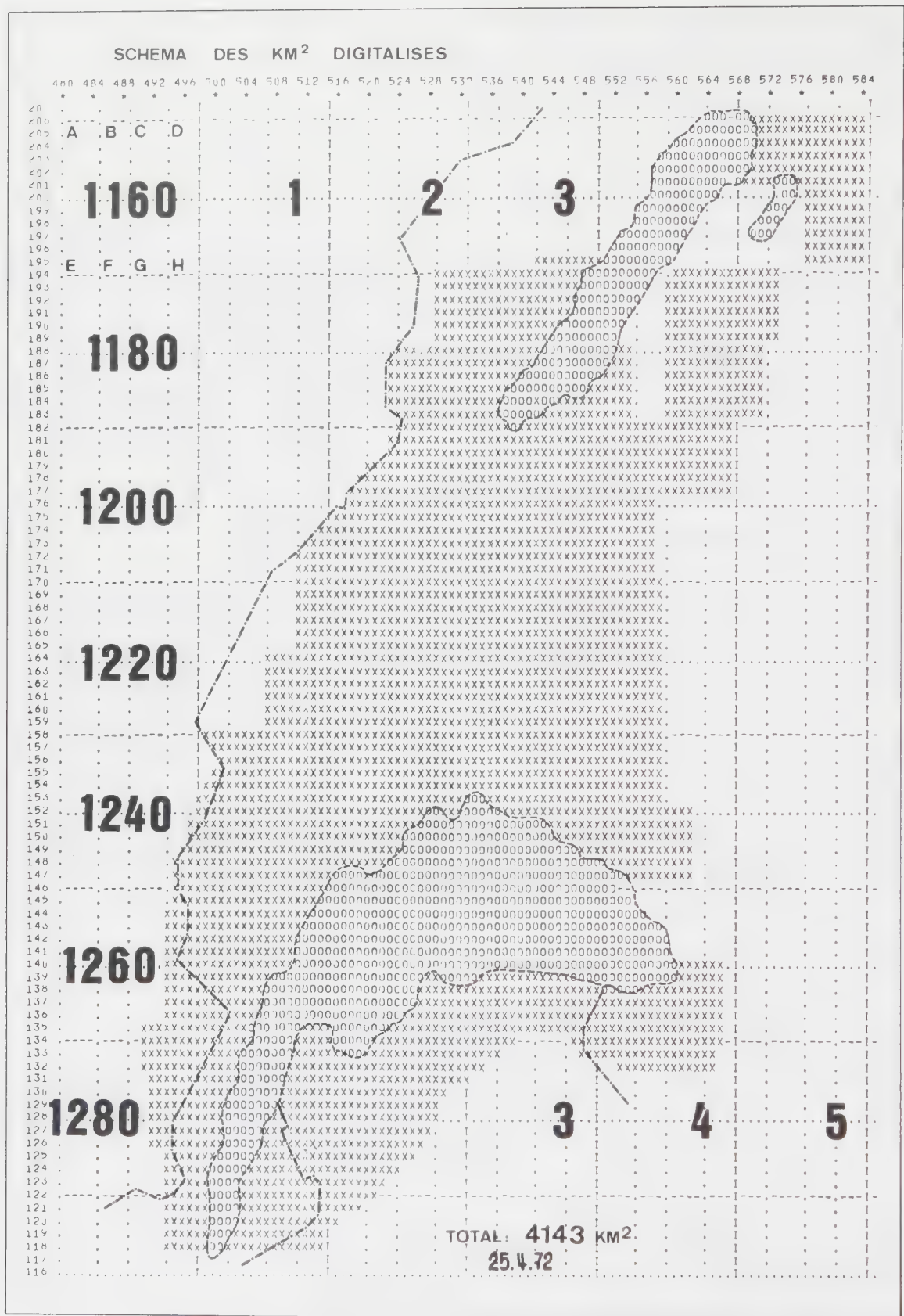


Fig. 6 Schéma des „km²” digitalisés.

Afin de vérifier la fiabilité de notre information topographique, nous avons établi plusieurs barrages de vérification. Il ressort de cette inquisition que le taux d'erreurs, lors de la création du fichier, est de 1 pour 1300 valeurs numériques et que le 99 % des écarts par rapport à la topographie originale est situé entre 0 et 13 mètres.

Arbitrairement nous avons choisi de ne corriger que les points où l'erreur dépasse 20 mètres; ces points sont rares et n'interviennent que dans le 0,37 % des altitudes digitalisées mais ils ont cependant nécessité 5000 vérifications et corrections (voir fig. 7).

Il aurait été bien meilleur de procéder à la double digitalisation de chaque "km²", de comparer les altitudes entre elles et de les corriger sitôt que le seuil d'écarts — à déterminer à l'avance — est dépassé. Malheureusement ce procédé double le prix de la digitalisation et, par conséquent, nous avons dû restreindre l'extension de notre étude. La digitalisation du relief topographique des différents modèles a été entièrement financée par l'Institut de Géophysique de Lausanne.

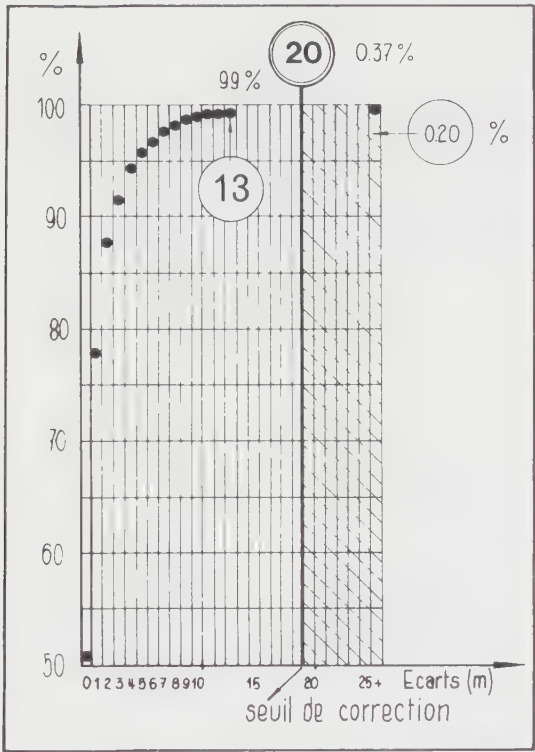
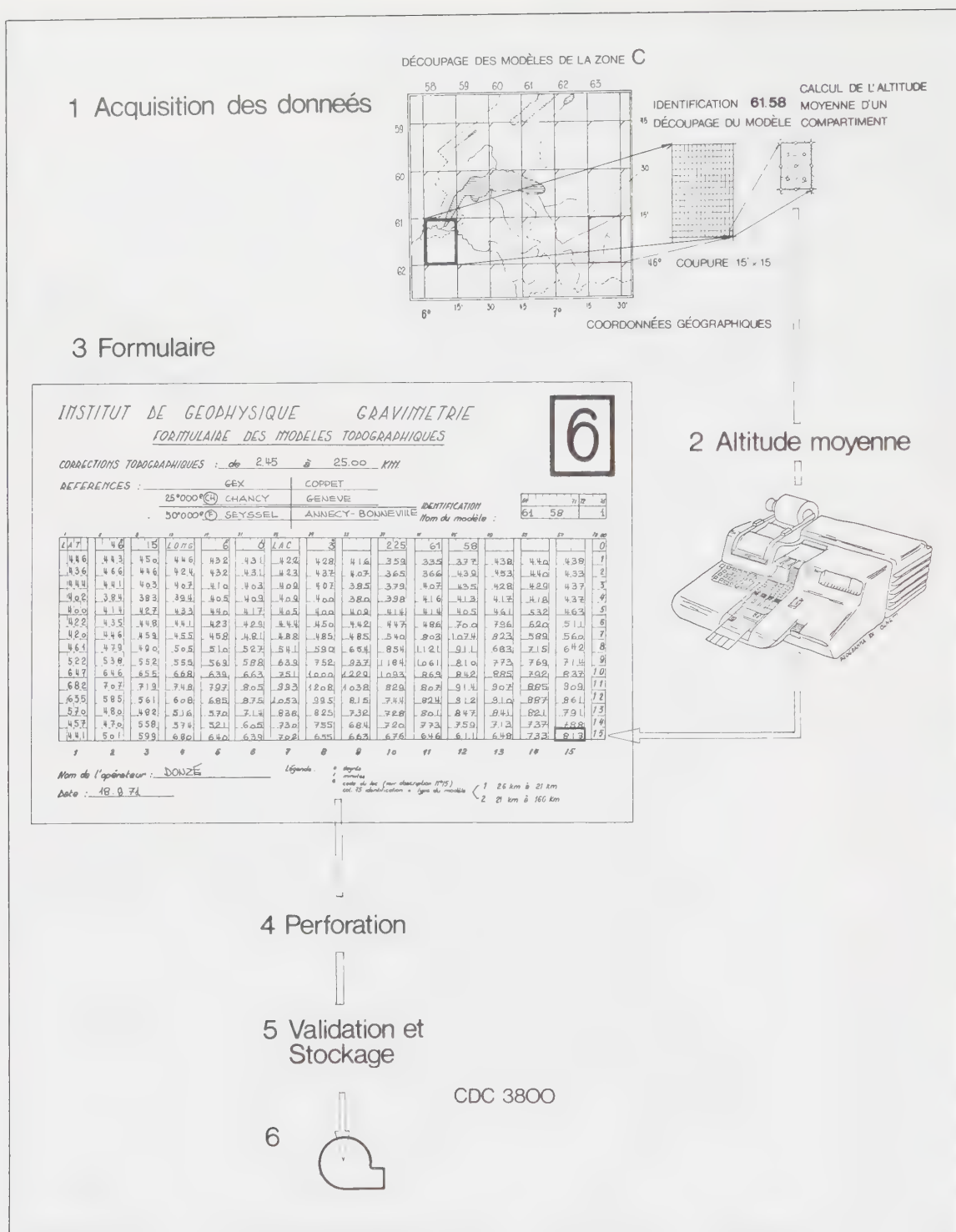


Fig. 7 Graphique des écarts sur l'ensemble des altitudes du fichier RELIEF.

4.4. LES ZONES C ET D OU ZONES LOINTAINES

Le découpage de ces modèles topographiques n'est plus référencié aux coordonnées rectangulaires suisses mais aux coordonnées géographiques. Ainsi, il est plus aisé de les construire, compte tenu des différentes projections nationales utilisées pour les diverses cartes topographiques à l'échelle 1 : 50.000 et 1 : 100.000 des pays limitrophes de la Suisse.



4 Perforation

5 Validation et Stockage

6

CDC 3800

Fig. 8 Schéma de l'acquisition des altitudes moyennes des modèles C et D.

Les modèles lointains sont des modèles d'altitude moyenne; en vertu du principe de la décroissance de l'influence gravifique avec l'éloignement de la station, ils nécessitent une moindre précision que les modèles proches. En voici les caractéristiques:

Modèles C — coupure 15' x 15' soit 15 x 15
compartiments (1' x 1')

Modèles D — coupure 1° x 2° soit 20 x 40
compartiments (3' x 3')

L'altitude moyenne de chaque compartiment est obtenue à partir de 13 valeurs réparties uniformément et systématiquement dans le compartiment. Ces valeurs d'altitude sont estimées à ± 5 mètres.

Un certain nombre de ces relevés a été effectué à la main, les moyennes arithmétiques étant calculées grâce à un mini-ordinateur de table OLIVETTI PROGRAMMA 101. D'autres, la majorité, ont été calculés à partir d'un fichier RELIEF de la Suisse sur bande magnétique. Ce fichier a été constitué par l'Institut de la Recherche Opérationnelle à Zurich et il a été mis à notre disposition par l'intermédiaire de mon camarade J.J. Wagner, chef des travaux au Laboratoire de Géophysique de Genève, et de M. Fischer de la Commission Géodésique Suisse de Zurich (ETHZ).

Les données de ce fichier ont été tirées des cartes nationales au 1 : 25.000 et 1 : 50.000 selon une grille carrée, respectivement de 250 mètres et 500 mètres d'intervalle. L'écart toléré en altitude est de ± 5 mètres.

Nous avons élaboré plusieurs programmes afin de parvenir à transformer cette grille de digitalisation altimétrique en modèles d'altitude moyenne. Grâce à cette élaboration, nous avons pu établir plus de 164 compartiments pour la zone C (dont 126 complets) et 20 pour la zone D (dont 10 complets).

Les fichiers des modèles topographiques C (fig. 9) et D (fig. 10) couvrent respectivement une superficie de 74.500 "km²" et 240.000 "km²".

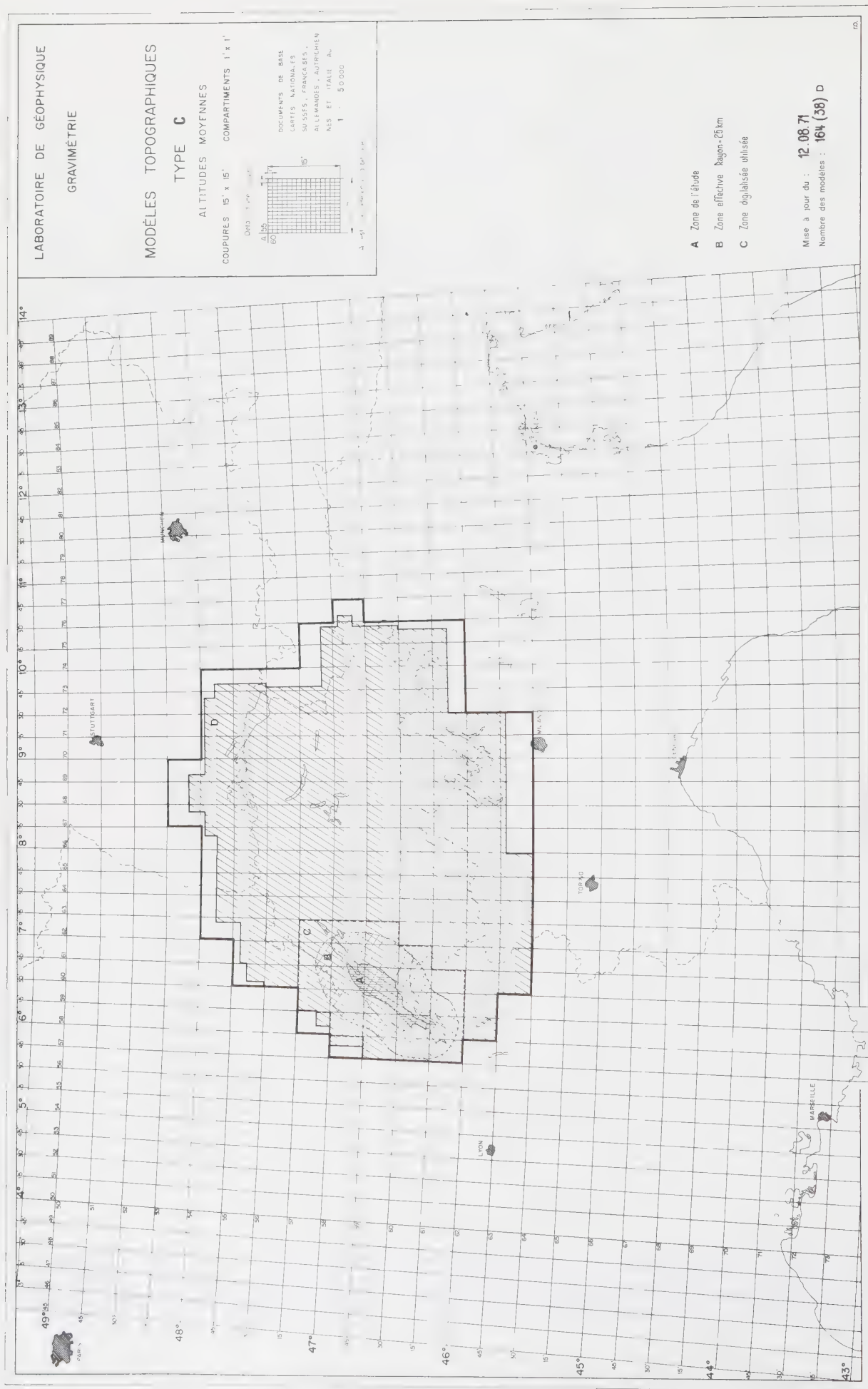


Fig. 9 Modèles topographiques de la zone C.

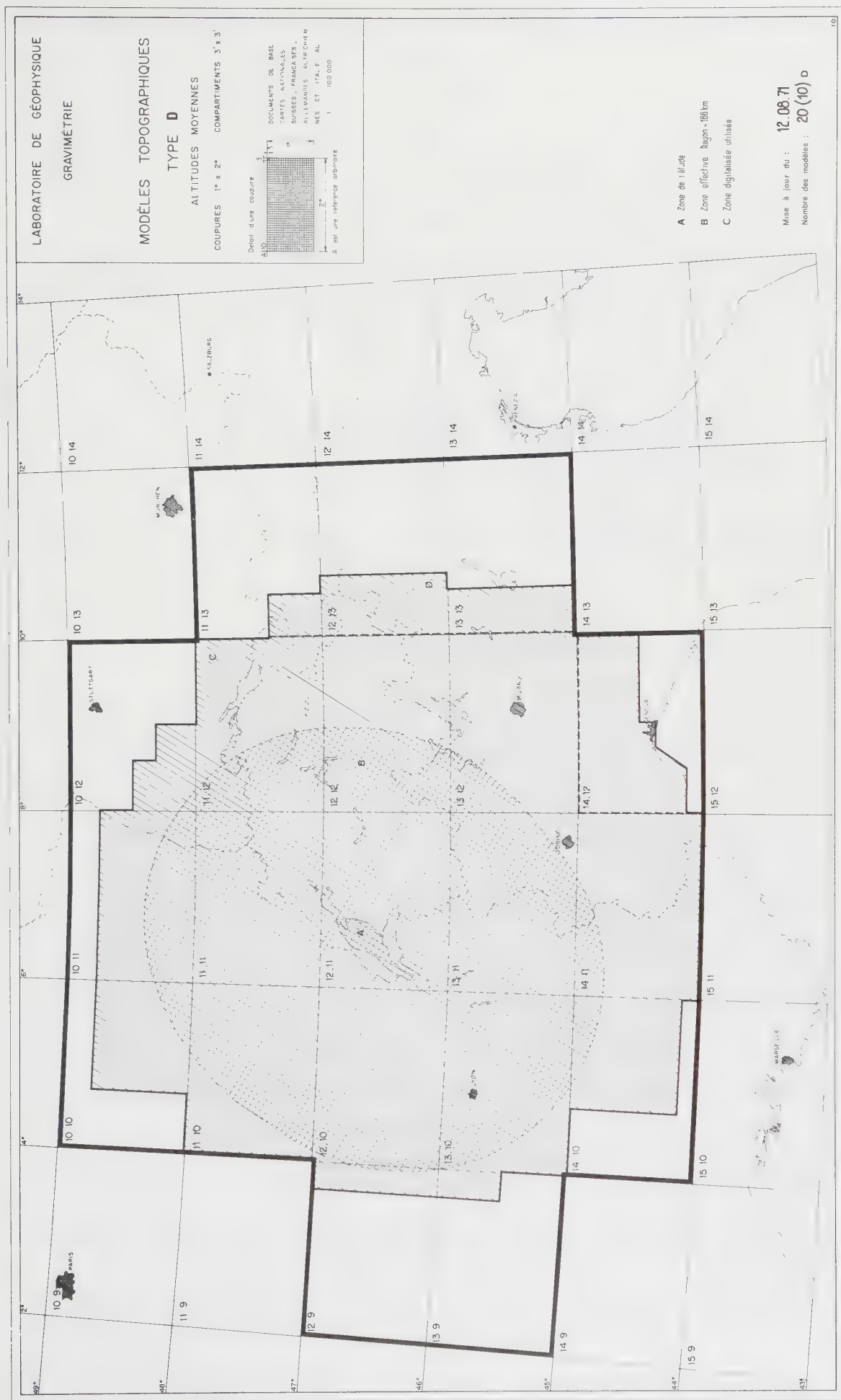


Fig. 10 Modèles topographiques de la zone D.

CHAPITRE 5 – VERS UN SYSTÈME DE TRAITEMENT GRAVIMÉTRIQUE GÉRÉ PAR L'ORDINATEUR

5.1. LA CARTE GRAVIMÉTRIQUE A GRANDE ÉCHELLE

Depuis la création de la Commission Géophysique Suisse, il est question d'entreprendre un levé gravimétrique couvrant tout le pays. Ce projet entraîne de nouvelles exigences que les systèmes de levé et de traitement envisagés doivent s'efforcer de satisfaire.

Ces exigences sont, dans les grandes lignes, les suivantes:

- l'étude de plusieurs milliers de "km²"
- une densité de stations relativement élevée (2 stations par "km²"),
- le raccordement au réseau fédéral des bases gravimétriques,
- une grande précision de mesure,
- la mise sur pied d'une organisation nouvelle supportant de tels critères.

D'autre part, rien ne peut être entrepris avant que ne soient complétées et coordonnées les études effectuées dans le passé par les Instituts de Géophysique de Lausanne et de Genève.

5.2. HISTORIQUE DES ÉTUDES GRAVIMÉTRIQUES ROMANDES

Ces études furent les suivantes (fig. 11):

- A) En 1954-1955, Edouard Poldini établit un réseau de bases gravimétriques entre Genève et Fribourg puis dirigea diverses études locales exécutées par ses assistants (Biblio. No 20).
- B) Dans ce cadre, en 1955-1956, F. Bungener commença le relevé gravimétrique entre Orbe - Yverdon et Echallens. Cette étude fut étendue en 1959-1960 par J.P. Burri. L'étude globale fit l'objet de son diplôme (Biblio. No 2).
Durant les années 1956-1965 un grand nombre de stations gravimétriques furent implantées par le Laboratoire de Lausanne, principalement par MM. Mercier et O. Gonet (Biblio. No 7). Malheureusement, les documents publiés ou laissés au Laboratoire ne nous ont pas permis de tirer parti de ces travaux et le levé de ces régions fut à nouveau entrepris.
- C) Dès 1966, sous la direction du Professeur C. Meyer de Stadelhofen, H. Lazreg mène à chef, dans le cadre de sa thèse de doctorat (Biblio. No 12), la continuation vers le nord de l'étude de J.P. Burri.
- D) L'extension au sud de cette même étude fut réalisée par P. Corniche de 1967 à 1969 (Biblio. No 4).
- E) La poursuite de ces travaux sur les rives du lac Léman a été entreprise en 1968 par R. Olivier avec l'aide de A. Romanesco (Biblio. No 21).
- F) H. Lazreg réalisa pour le compte du Laboratoire de Lausanne le relevé gravimétrique de la région comprise entre l'Aubonne et la frontière genevoise.

Si bien qu'avant nos travaux, la mosaïque gravimétrique romande était constituée par 6 études locales, assez disparates, raccordées au réseau Poldini de bases gravimétriques.

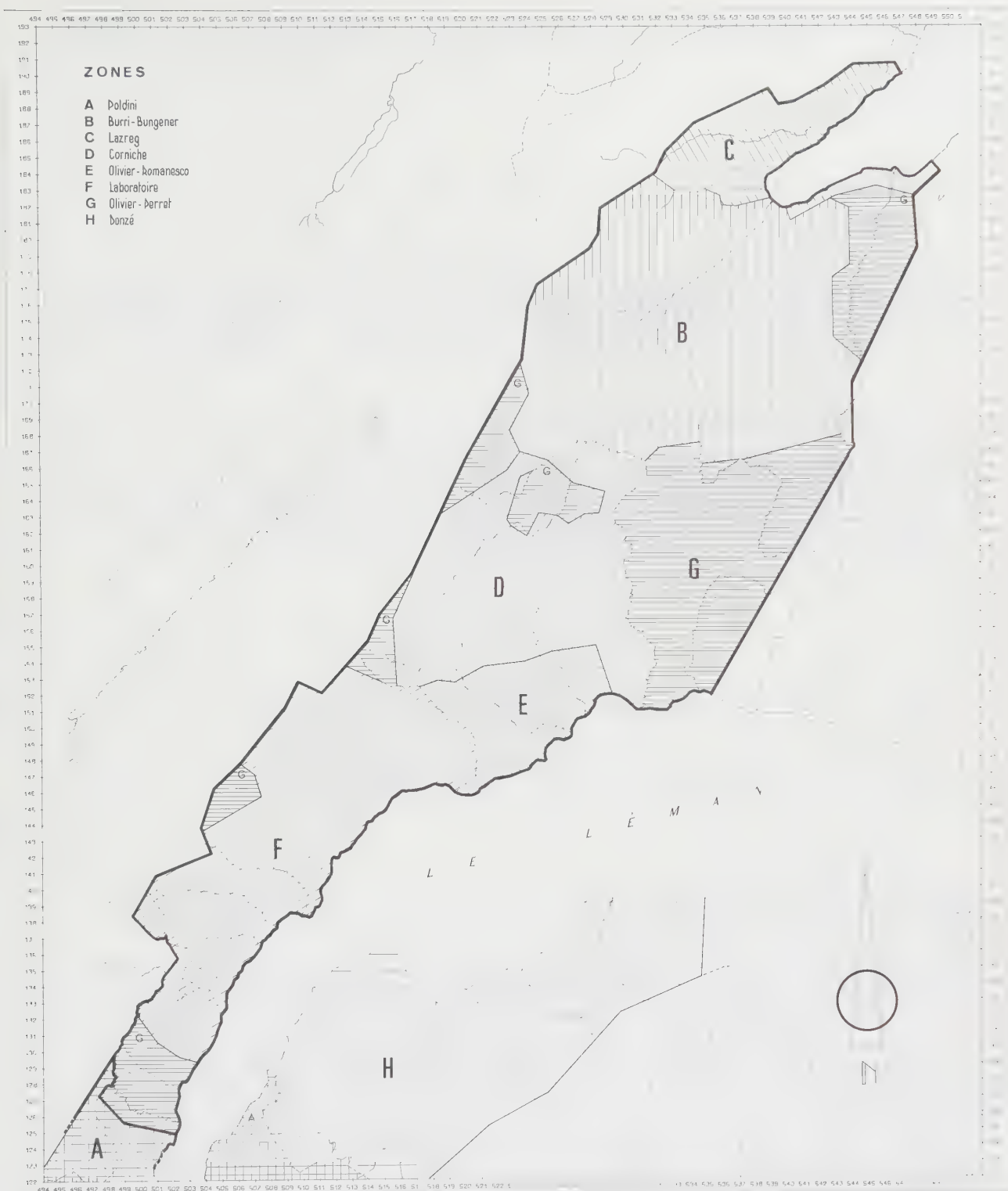


Fig. 11 Mosaïque des différents travaux constituant notre étude gravimétrique.

Il nous faut mentionner également les travaux de thèse entrepris dans la vallée du Rhône par O. Gonet (Biblio. No 8) et J.-J. Wagner (Biblio. No 23) ainsi que le travail de diplôme de D. Cavin en 1969 (Biblio. No 3) dans le Lavaux. Ces travaux n'ont pas été incorporés à notre étude.

5.3. L'ASSEMBLAGE ET L'HARMONISATION DE LA MOSAIQUE GRAVIMÉTRIQUE ROMANDE

Avant de pouvoir tirer profit des diverses études partielles, il fallait, d'une part, les raccorder au réseau gravimétrique fédéral et, d'autre part, rendre les divers travaux comparables en qualité et en précision, enfin combler les lacunes séparant les zones prospectées (parties G).

5.4. LA NÉCESSITÉ D'UN SYSTÈME DE TRAITEMENT GÉRÉ PAR L'ORDINATEUR

Nous reviendrons ci-après sur ces trois problèmes et, entre autres, sur celui de l'harmonisation des études diverses. C'est en effet tout particulièrement ce problème qui nous a incité à mettre sur pied un système de traitement géré par l'ordinateur. Un tel système exige et assure une certaine homogénéité dans l'acquisition et dans l'élaboration des données gravimétriques.

CHAPITRE 6 – MESURES NOUVELLES ET ANCIENNES, ÉLABORATION ET HARMONISATION

6.1. LE RACCORDEMENT DES RÉSEAUX DE BASE

Le réseau Poldini raccordé au réseau français par Moillesulaz (GE) comporte 23 bases réparties entre Genève et Fribourg. Les valeurs gravimétriques sur ces bases s'écartent de façon systématique de celles publiées des 1959 pour le réseau fédéral. L'écart est de + 1,13 milligals, $\pm 0,05$.

Cet écart a été estimé puis corrigé grâce, pour une bonne part, aux mesures de E. Klingelé.

Nous avons pu établir plus de cent bases, dont les descriptions détaillées se trouvent dans notre thèse. Parmi ces bases sont incluses celles du réseau fédéral de deuxième ordre, celles du réseau Poldini corrigées et des bases intermédiaires placées par nos soins.

6.2. LA PRÉCISION DES RÉSULTATS ANCIENS

Cette précision varie selon les études; elle est évaluée par les auteurs successifs à des valeurs comprises entre 0,05 et 0,11 milligal.

Compte tenu de l'erreur liée au raccordement des bases gravimétriques, nous estimons l'erreur moyenne à $\pm 0,18$ milligal et l'erreur maximum à $\pm 0,27$ milligal.

6.3. CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES ÉTUDES ANCIENNES ET NOUVELLES

La presque totalité de notre étude est située sur le plateau molassique modérément accidenté. Nous avons implanté 1586 stations gravimétriques couvrant 1030 "km²", à raison de 1,55 stations par "km²".

Les mesures ont toutes été faites sur des bornes de triangulation de troisième ordre, ce qui leur assure un bon repérage, ± 5 cm., tant en altitude que dans le plan horizontal.

Les mensurations anciennes et nouvelles ont été réalisées grâce à trois gravimètres Worden. La correction des dérives a été faite par la méthode des cycles. La dérive est considérée comme normale et les mesures acceptées, lorsqu'elle est comprise entre 0,02 et 0,04 milligal à l'heure, déduction faite de la variation luni-solaire.

En chaque station on relève la moyenne de cinq ou six mensurations consécutives.

Les corrections pour les études anciennes et récentes ont été homogénéisées dans la mesure du possible; en particulier, pour toutes les études la correction topographique a été poussée jusqu'à 166 kilomètres.

La digitalisation kilométrique du modèle de la zone B représente 1680 "km²" digitalisés (fig. 12).

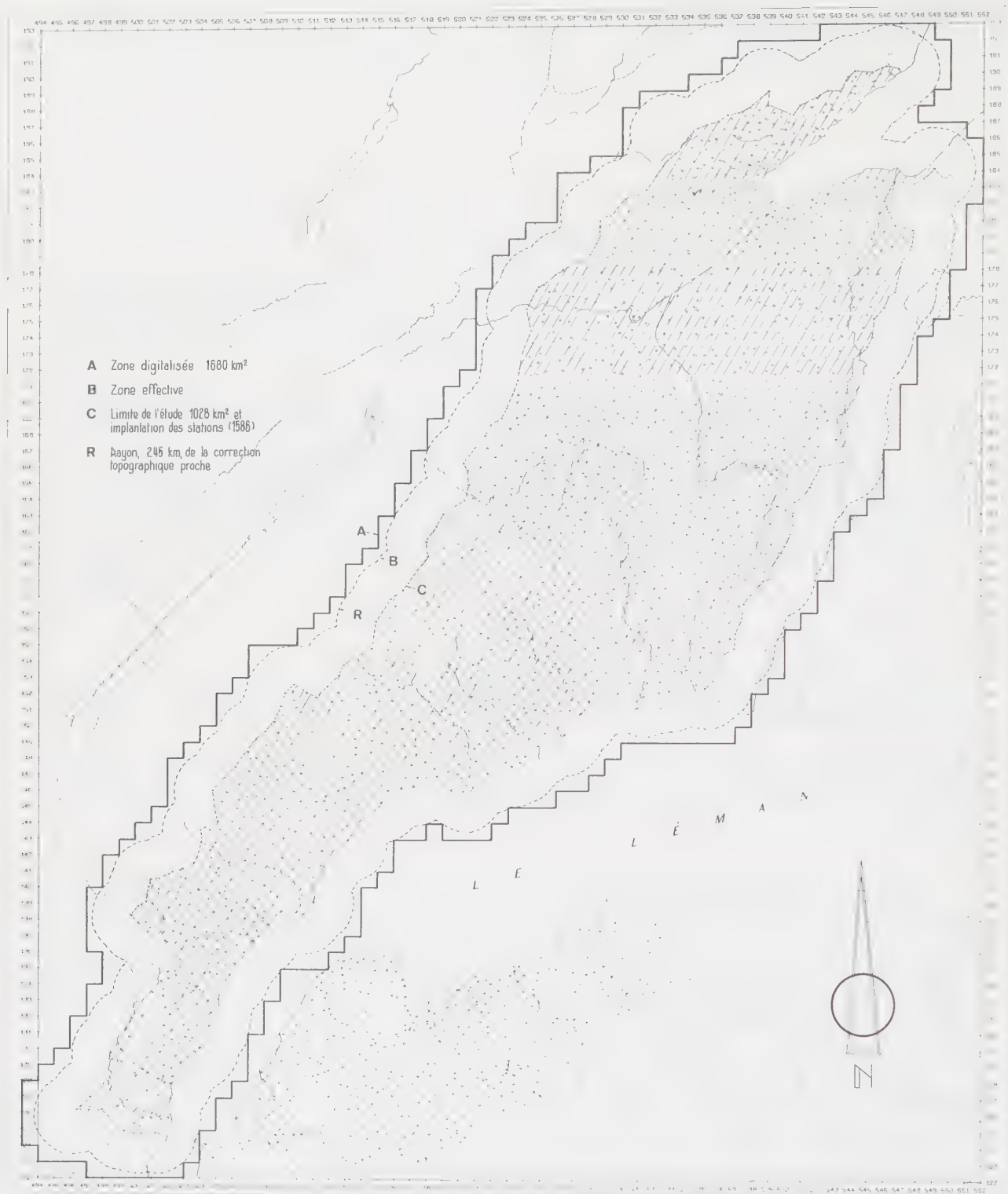


Fig. 12 Zone digitalisée de la zone b de notre étude et emplacement de nos 1586 stations gravimétriques.

6.4. LES DENSITÉS CHOISIES

La correction plateau et la correction topographique, nous l'avons vu, font intervenir la densité du sous-sol. Le choix de cette densité est quelque peu arbitraire mais pas du tout indifférent. En effet, de ce choix dépend la mise en évidence de telle ou telle structure sur la carte de BOUGUER.

Une fois les données de base rassemblées, il est facile, grâce à l'ordinateur, de calculer des cartes de BOUGUER pour diverses densités. Nous avons choisi, quant à nous, les densités : 2,20 - 2,30 - 2,40 - 2,50 - 2,60 et 2,67.

Parmi toutes ces cartes, celle établie avec la densité 2,40 semble la mieux adaptée aux problèmes hydrologiques du plateau molassique. C'est cette carte qui, en particulier, met le mieux en évidence les sillons entaillés dans la molasse et comblés de dépôts quaternaires meubles.

7.1. GÉNÉRALITÉS

Nous avons vu que d'une part les vastes dimensions de l'étude à exécuter ainsi que, d'autre part, l'obligation de stocker une information digitale abondante et la nécessité d'obtenir pour tous les secteurs étudiés une qualité uniforme, nous ont conduits à mettre sur pied un système de traitement géré par l'ordinateur.

Ce système est schématisé sur la figure 13. Sur ce schéma on distingue les étapes principales suivantes:

- l'acquisition des données topographiques, géographiques et gravimétriques,
- la constitution du fichier définitif des données gravimétriques,
- le calcul de la correction topographique proche,
- l'élaboration de la correction topographique lointaine et de l'anomalie de BOUGUER,
- le calcul des effets régionaux et résiduels,
- la représentation graphique des résultats.

Chacun de ces points mérite un examen quelque peu détaillé.

7.2. L'ACQUISITION DES DONNÉES

L'acquisition est l'opération tampon entre la prospection et le traitement numérique.

L'information de base est très diverse. Elle est composée du protocole cadastral et du carnet de mesures de prospection, voir fig. 14.

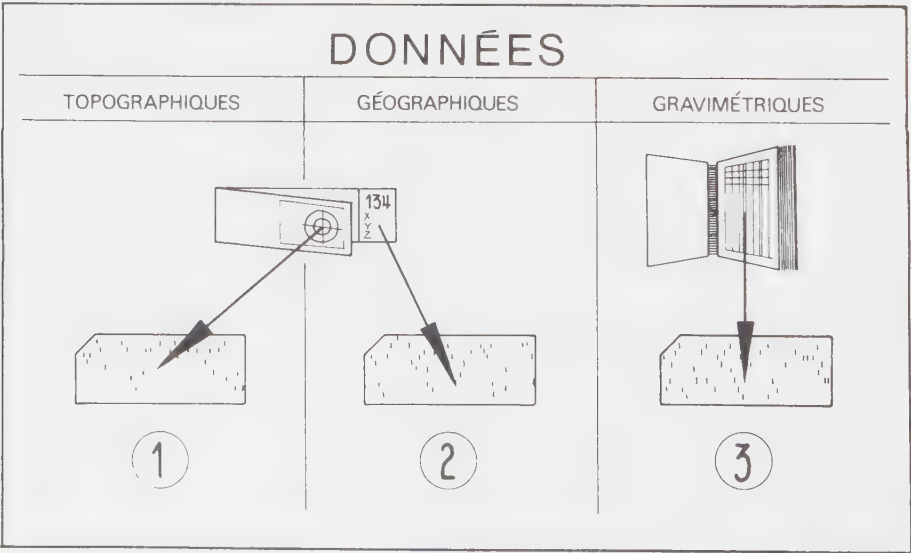


Fig. 14 L'acquisition des données.

SYSTÈME GRAVIMÉTRIQUE GÉRÉ PAR L'ORDINATEUR

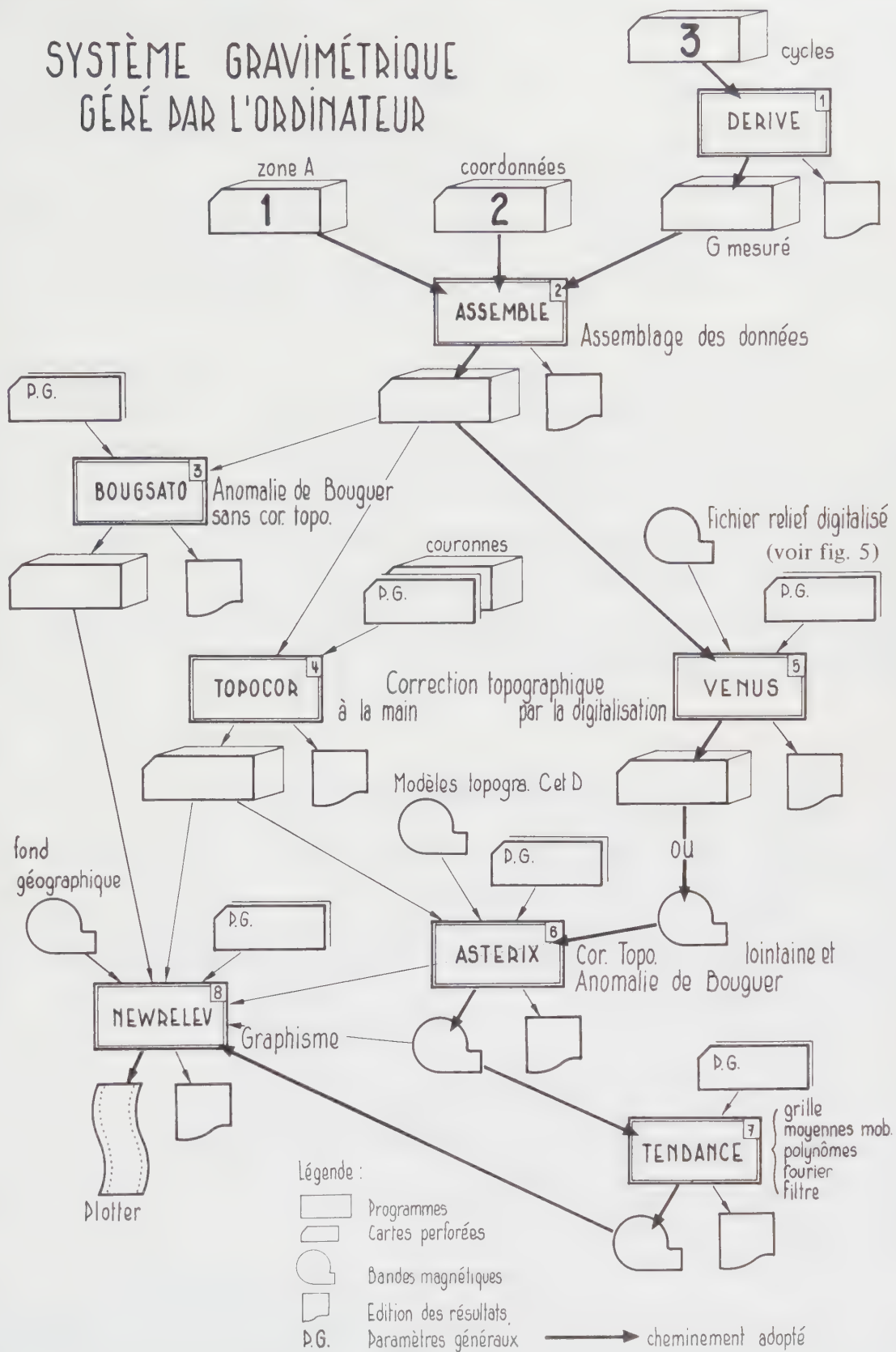


Fig. 13 Schéma général du système de traitement gravimétrique géré par l'ordinateur.

Les valeurs relevées sont reportées sur des formulaires adéquats par l'opérateur au cours de la prospection, puis reprises sur des cartes perforées. Chaque station de mesures nécessite trois de ces cartes.

A ce stade, les cartes portent:

- le numéro de cadastre du repère topographique et le numéro de la station,
- les données géographiques qui localisent la station en X, Y & Z.
- les données topographiques qui décrivent le relief proche de la station, c'est-à-dire dans la couronne qui s'étend de 0 à 2 mètres et dans celle qui va de 2 à 20 mètres,
- les données gravimétriques constituées par les cycles de mesures où figurent les valeurs en gradation de gravimètre, des temps et des températures.

7.3. LA CONSTITUTION DU FICHIER DÉFINITIF DES DONNÉES GRAVIMÉTRIQUES

Ce fichier définitif est l'assemblage, en un seul jeu de cartes perforées, de toutes les données nécessaires à l'établissement de la carte de BOUGUER, sans correction topographique.

Pour obtenir ce fichier, il faut faire subir aux informations, collectées au premier stade de la prospection, un premier traitement.

Il s'agit d'abord de corriger la dérive, puis de calculer la différence obtenue par rapport à la base de référence et, enfin, de passer des valeurs connues en divisions du gravimètre et température à des valeurs en milligals.

7.4. LE CALCUL DE LA CORRECTION TOPOGRAPHIQUE

Nous ne décrirons que le calcul fait à l'aide de la digitalisation du relief des zones A, B, C et D.

Rappelons que la digitalisation de la première zone est opérée sur le terrain et est seule dépendante de l'emplacement de la station. Les suivantes sont exécutées en laboratoire.

7.4.1. LA CORRECTION TOPOGRAPHIQUE PROCHE

Le traitement numérique est réalisé par le programme VENUS; il est divisé en quatre parties:

- la lecture des données générales sur cartes,
- la préparation,
- l'exécution,
- l'édition et le stockage des résultats.

L'exécution globale s'effectue en deux passages; un premier passage qui sert à déterminer s'il existe des stations dont le relief ne serait pas entièrement digitalisé, un second passage où s'opère la recherche de l'information topographique et le calcul de la correction topographique. La liaison entre les deux passages est opérée par l'entremise d'une bande magnétique.

Le fichier RELIEF kilométrique digitalisé est conservé sur bande magnétique.

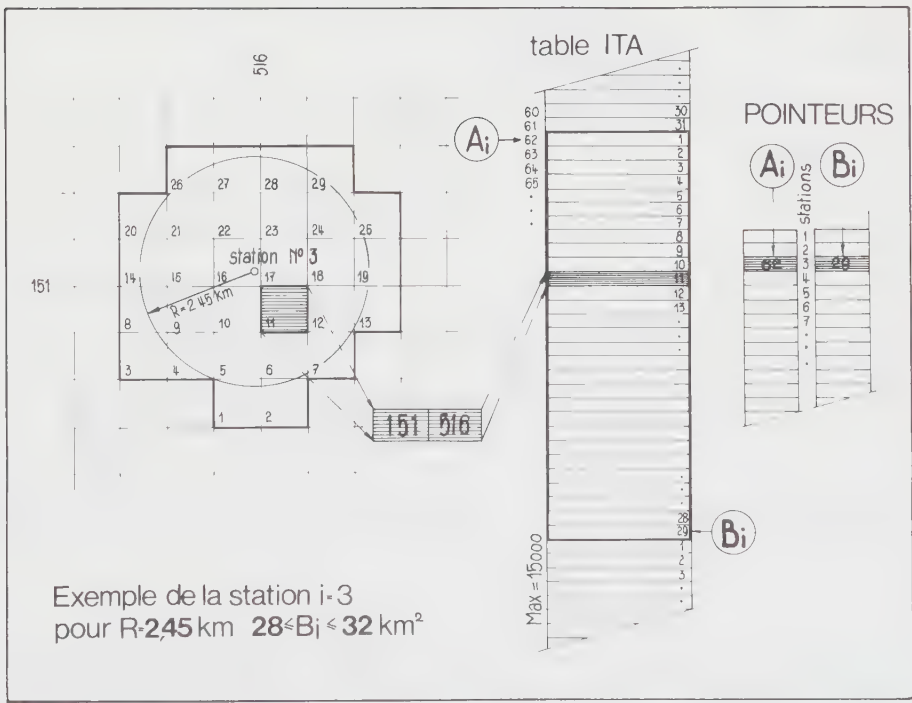
Voici les phases principales du traitement:

1ère partie: la lecture des données

Lecture sur cartes des paramètres généraux définissant les caractères de l'étude et examen des données assemblées pour les stations.
Validation de ces informations et édition des erreurs.

2ème partie: la préparation

- Phase 1 Création de la table générale (ITA) des identifications kilométriques (IK) de tous les "km2" utilisés par chacune des stations, voir fig. 15.
- Phase 2 Création de la table restreinte (ITB) des IK des "km2" utiles à toutes les stations (fig. 16).
- Phase 3 Elimination des stations dont le relief n'est pas entièrement digitalisé.
- Phase 4 Modification de la table ITA par l'adjonction à chaque IK de son adresse précisant sa séquence dans la table ITB.
- Phase 5 Ecriture sur un fichier temporaire sur disque ou sur bande de toutes les informations et données préparées dans cette partie.



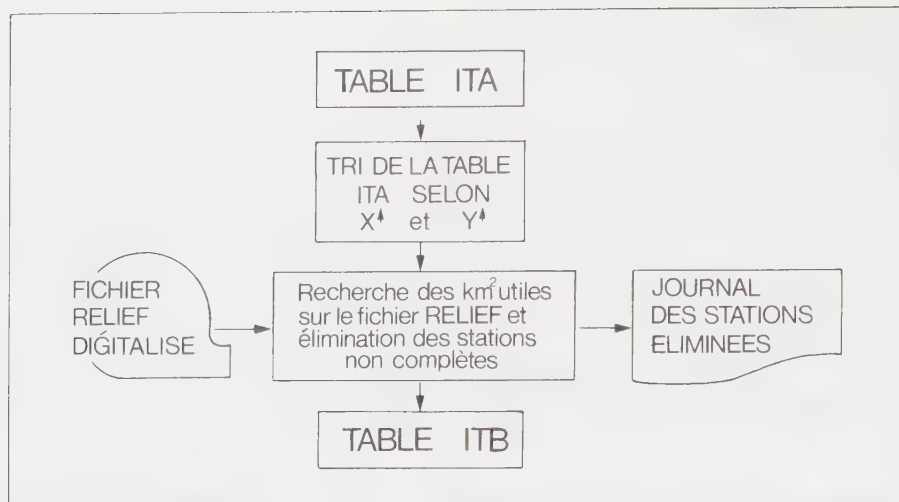


Fig. 16 Création de la table ITB.

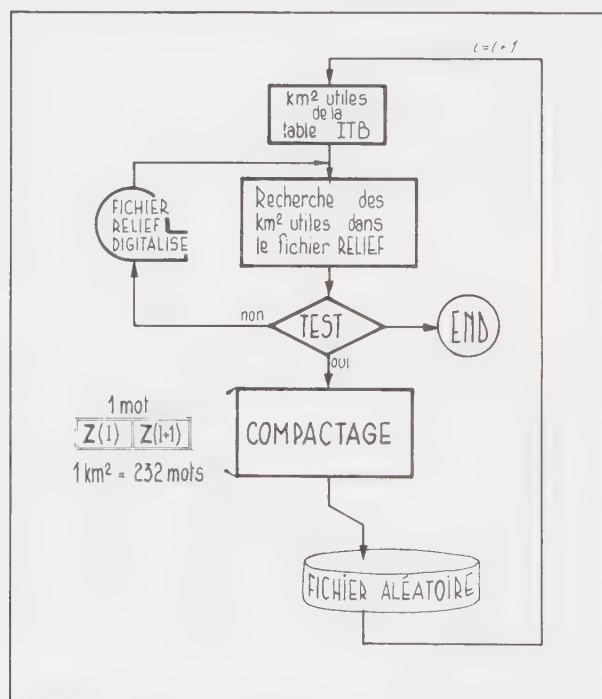


Fig. 17 Constitution du fichier à accès aléatoire.

3ème partie: l'exécution

- Phase 6 Lecture du fichier temporaire (phase 5).
- Phase 7 Création du fichier de l'information complète du relief sur disque selon la méthode de l'accès aléatoire dont les IK constituent la table ITB, à partir du fichier RELIEF digitalisé.
- Phase 8 Recherche station par station des "km2" de chacune d'entre elles sur le fichier aléatoire et calcul des écarts moyens en valeur absolue selon la configuration de couronnes données.

Calcul de la correction topographique terrestre et lacustre pour toutes les densités choisies, voir fig. 18.

Ecriture des résultats sur un fichier temporaire sur disque.

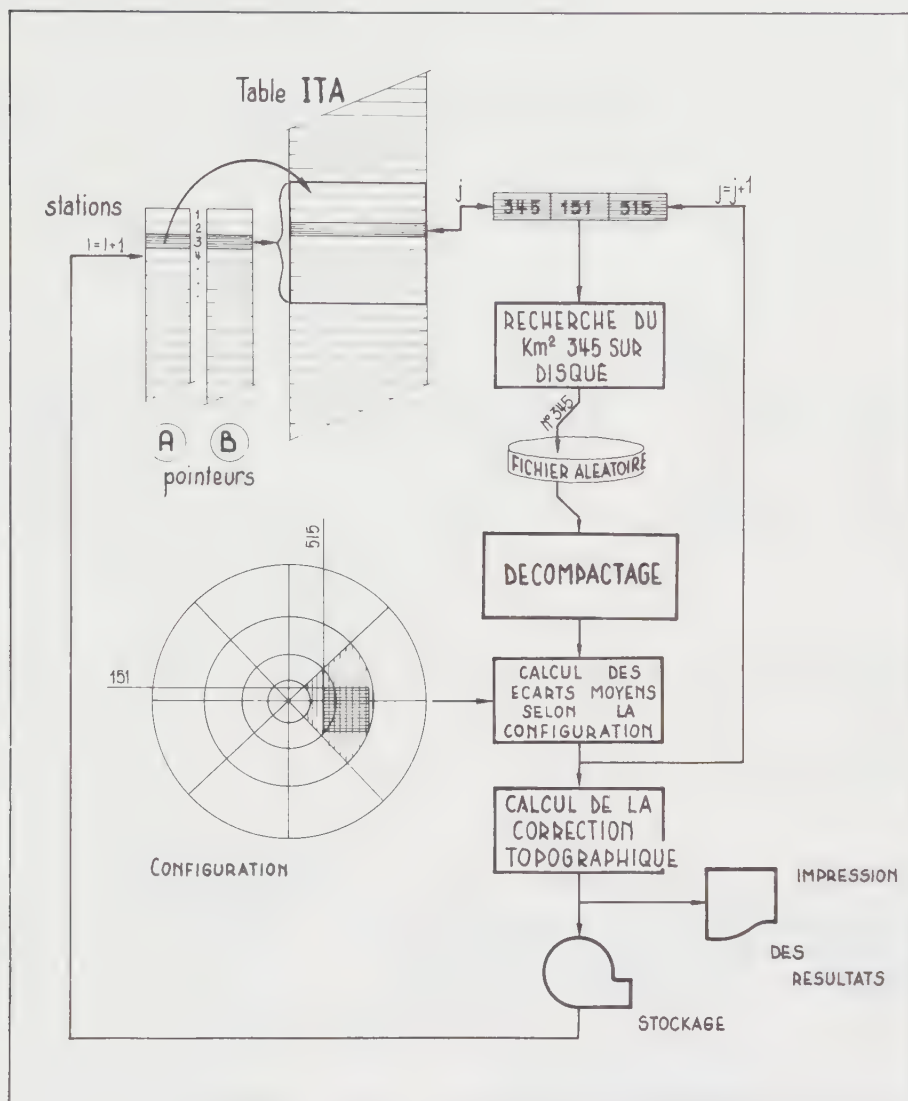


Fig. 18 Calcul de la correction topographique proche.

4ème partie: l'édition et le stockage des résultats

Lecture des résultats du fichier temporaire (phase 9).

Edition récapitulative des résultats et création d'un fichier RESULTAT sur bande magnétique.

Ce programme permet de traiter 10 stations en moins de 100 secondes. Cette extrême rapidité a pu être réalisée grâce à l'utilisation des routines d'accès aléatoire du système RAPROC. Ces programmes permettent de piquer "au hasard" n'importe quelle information stockée au préalable de façon adéquate sur un disque magnétique. L'emploi d'un tel système nous a permis de réduire au minimum la durée de la recherche de l'information kilométrique du relief digitalisé.

Une telle rapidité pour la correction proche est indispensable du fait même des principales caractéristiques de notre étude qui sont:

- La surface digitalisée 1680 “km²”.
- Le nombre d’altitudes digitalisées par “km²”: 36 dans la couronne de 20 à 30 mètres, 441 dans la couronne de 300 à 1500 mètres et 1681 dans la couronne de 1500 à 2450 mètres.
- Le nombre maximum de stations par passage: 300.
- La surface digitalisée par station: en moyenne 29 “km²”.
- Les densités utilisées: 2,20 - 2,30 - 2,40 - 2,50 - 2,60 et 2,67.

7.4.2. LA CORRECTION TOPOGRAPHIQUE LOINTAINE

Le calcul de cette correction est incorporé au programme ASTERIX de l’élaboration de l’anomalie de BOUGUER. Rappelons que ce programme nous a été fourni par le Service Géologique des Etats-Unis; nous l’avons adapté à nos besoins.

Les modèles topographiques des zones C et D sont stockés sur bande magnétique.

7.5. L’ÉLABORATION DE L’ANOMALIE DE BOUGUER

L’expression du modèle gravimétrique est:

$$AB = GM - GTH + GAL - GPL + GTOPO$$

Le traitement numérique est divisé en trois parties (fig. 19):

- La lecture des données et leur transformation.
- La recherche des modèles et le calcul de la correction topographique lointaine.
- L’élaboration de l’anomalie de BOUGUER.

1ère partie: la lecture des données

Cette étape comporte:

- La lecture des paramètres généraux sur cartes définissant l’étude des stations gravimétriques sur bande magnétique, résultat du programme VENUS.
- La transformation des coordonnées rectangulaires suisses en coordonnées géographiques de chaque station (prog. LATLONG).
- Le calcul de certains termes de l’anomalie GTH et GAL.

2ème partie: la recherche des modèles et le calcul de la correction topographique

Ces calculs sont entrepris station après station, modèle après modèle et zone après zone, ici les zones C et D.

Après le calcul de chaque zone, les stations dont le relief n’est pas entièrement digitalisé sont récapitulées ainsi que la liste des modèles absents.

PROGRAMME ASTERIX

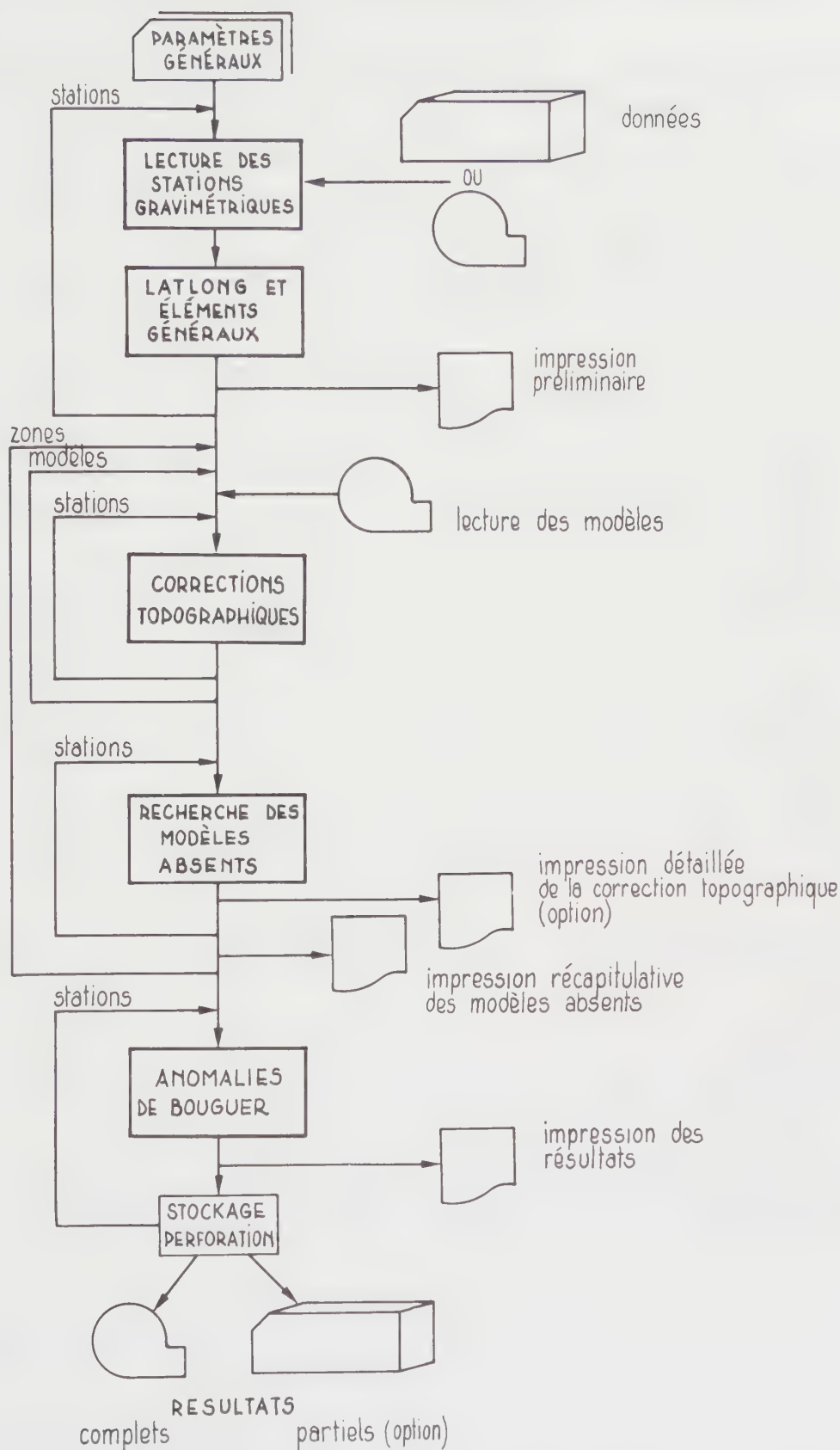


Fig. 19 Schéma de traitement de la correction topographique lointaine et de l'anomalie de BOUGUER.

3ème partie: l'élaboration de l'anomalie de BOUGUER

Les termes G_{PL} et G_{TOPO} sont établis pour toutes les densités choisies et l'anomalie globale est calculée.

Un fichier "résultats" est créé sur bande magnétique contenant toutes les informations données et résultats.

La durée du traitement est d'environ 3 secondes par station, compte tenu des caractéristiques suivantes:

- 350 stations au maximum par passage,
- zone C de 2,45 à 25 km. soit 40 modèles,
- zone D de 25 km. à 166 km. soit 10 modèles.

ETUDE	GRAVIMETRIQUE	DE	PLATEAU	VAUDOIS	(PARTIE OUEST)	DE	VERSOIX	A	CONCISE	ANOMALIES	DE	BOUGUER	PAGE					
CADASTRE	NUMERO	STATION	ZONE	X	Y	Z	LATITUDE	LONGITUDE	G	MESURE	G	THEO.	COR.	TOPO.	2.20	2.40	2.50	2.67
63415	484		4	153017.9	518939.5	673.57	46 31 28	6 22 58	573.119	766.976	766.976	1.249			-47.752	-53.349	-56.146	-60.899
63418	485		4	153321.1	519317.2	652.87	46 31 39	6 23 16	577.711	767.231	767.231	1.326			-47.828	-53.239	-55.942	-60.537
63424	486		4	153773.1	519502.0	652.98	46 31 54	6 23 25	577.952	767.607	767.607	1.448			-47.855	-53.251	-55.947	-60.529
63419	487		4	153520.6	519409.7	659.57	46 31 45	6 23 44	575.646	767.396	767.396	1.435			-48.547	-53.997	-56.721	-61.347
63421	488		4	153782.1	520902.8	648.36	46 31 54	6 24 30	577.828	767.622	767.622	1.009			-49.310	-54.715	-57.418	-62.310
63127	489		3	153382.6	521209.9	655.22	46 31 42	6 24 46	575.313	767.305	767.305	1.304			-49.834	-55.258	-57.968	-62.573
63422	490		4	153893.1	521252.1	651.38	46 31 58	6 24 45	576.775	767.712	767.712	1.071			-49.762	-55.185	-57.895	-62.500
63258	491		3	153127.0	521860.4	628.11	46 31 33	6 25 16	579.576	767.096	767.096	1.349			-51.186	-56.372	-58.961	-63.361
63291	492		3	153136.5	522829.5	534.87	46 31 31	6 26 1	603.732	767.036	767.036	0.934			-47.349	-51.799	-54.623	-57.853
63293	493		3	153792.6	523712.9	529.96	46 31 56	6 26 42	599.824	767.667	767.667	1.005			-52.901	-57.300	-59.497	-63.232
63281	494		3	153292.8	524727.9	516.17	46 31 40	6 27 30	601.420	767.261	767.261	0.740			-54.069	-58.378	-60.532	-64.193
63298	495		3	153288.3	525709.9	489.00	46 31 40	6 28 16	606.079	767.276	767.276	0.732			-55.287	-59.357	-61.406	-64.072
63279	496		3	153957.4	526019.3	517.39	46 31 59	6 28 30	601.066	767.742	767.742	0.930			-54.520	-58.812	-60.956	-64.600
63333	497		3	153529.9	526219.7	490.72	46 31 48	6 28 40	605.396	767.471	767.471	1.044			-55.585	-59.638	-61.663	-65.112
63335	498		3	153466.6	526926.5	490.02	46 31 46	6 29 13	605.513	767.426	767.426	0.728			-55.796	-59.881	-61.923	-65.393
63507	499		3	153194.1	527854.4	466.91	46 31 38	6 29 56	609.051	767.216	767.216	0.703			-57.047	-60.939	-62.884	-66.191
63346	500		3	153403.6	528197.8	474.10	46 31 45	6 30 13	607.283	767.396	767.396	0.780			-57.382	-61.325	-63.296	-66.164
63017	501		4	153248.7	529146.4	459.38	46 31 40	6 30 57	608.945	767.276	767.276	1.165			-58.395	-62.167	-64.052	-67.250
63021	502		4	153285.7	530507.9	397.27	46 31 42	6 32 1	620.223	767.321	767.321	0.773			-60.913	-64.216	-65.868	-68.675
63018	503		1	153389.2	532280.6	418.81	46 31 46	6 33 24	616.224	767.411	767.411	0.721			-60.410	-63.898	-65.641	-68.605
64010	504		1	153859.8	532567.5	437.05	46 32 1	6 33 37	612.383	767.802	767.802	1.095			-60.460	-64.053	-65.847	-68.894
64517	505		1	153354.8	533368.5	399.22	46 31 45	6 34 15	618.946	767.396	767.396	0.798			-61.821	-65.140	-66.800	-69.621
64011	506		1	153447.3	534037.6	428.67	46 31 49	6 34 47	612.605	767.487	767.487	1.255			-61.608	-65.114	-66.804	-69.835
64051	507		1	153276.2	534836.0	431.18	46 31 43	6 35 24	611.424	767.351	767.351	1.294			-62.081	-65.604	-67.364	-70.350
64026	508		1	154756.2	536938.9	609.24	46 32 32	6 37 2	576.626	768.569	768.569	0.840			-60.063	-65.139	-67.675	-71.384
64050	509		1	154415.9	536373.6	544.31	46 32 21	6 36 36	589.227	768.283	768.283	1.194			-60.930	-65.412	-67.649	-71.448
64054	510		1	154524.3	535539.5	474.44	46 32 24	6 35 56	604.660	768.373	768.373	0.925			-60.801	-64.730	-66.702	-70.044
64059	511		1	154839.1	535103.8	469.77	46 32 34	6 35 36	606.347	768.614	768.614	0.899			-60.378	-64.277	-66.226	-69.537
64052	512		1	154211.1	534925.4	430.51	46 32 13	6 35 32	613.368	768.103	768.103	1.057			-61.180	-64.734	-66.510	-69.528
64130	513		1	154119.5	533501.5	410.79	46 32 10	6 34 21	617.862	768.028	768.028	0.833			-61.017	-64.431	-66.138	-69.333
64019	514		1	154402.5	533009.2	441.77	46 32 19	6 33 58	611.200	768.238	768.238	1.621			-60.711	-64.207	-66.046	-69.063
63128	515		1	154836.7	532378.2	409.55	46 32 33	6 33 28	618.633	768.599	768.599	0.950			-61.008	-64.395	-66.037	-68.304
63127	516		1	154279.6	532200.6	403.71	46 32 15	6 33 20	619.369	768.133	768.133	0.814			-61.158	-64.513	-66.189	-69.040
63005	517		4	154518.3	531201.0	457.57	46 32 25	6 32 33	610.792	768.403	768.403	0.758			-58.467	-62.274	-64.177	-67.409
63004	518		4	154905.5	530876.1	462.24	46 32 34	6 32 17	610.464	768.629	768.629	0.682			-58.065	-61.921	-63.849	-67.125
63033	519		4	154138.6	530255.9	459.64	46 32 10	6 31 49	610.217	768.012	768.012	0.677			-58.261	-62.035	-64.012	-67.263
63083	520		4	154817.7	528628.1	459.83	46 32 31	6 30 32	612.154	768.538	768.538	0.690			-56.787	-60.625	-62.543	-65.814
63119	521		4	154533.5	528477.1	477.97	46 32 6	6 30 25	607.323	767.922	767.922	0.831			-57.009	-61.979	-62.963	-66.334
63340	522		3	154768.8	527824.1	491.73	46 32 29	6 29 55	606.256	768.493	768.493	0.666			-55.779	-59.888	-61.942	-65.434
63309	523		4	154357.0	526142.6	531.36	46 32 34	6 28 35	600.141	768.629	768.629	0.702			-53.469	-57.911	-60.132	-63.906
63339	524		4	154588.1	525930.5	527.72	46 32 22	6 28 26	600.657	768.328	768.328	0.672			-53.630	-57.979	-60.153	-63.832
63338	525		3	154305.2	525504.9	521.39	46 32 13	6 28 6	601.544	768.088	768.088	0.767			-53.887	-57.953	-59.984	-63.432
63296	526		3	154063.0	524919.8	495.47	46 32 5	6 27 38	606.294	767.892	767.892	1.308			-53.054	-57.198	-59.266	-62.779
63294	527		4	154249.5	524401.3	496.15	46 32 11	6 27 14	607.421	768.043	768.043	0.852			-51.719	-56.332	-58.727	-62.594
63276	528		4	154664.1	523589.9	564.22	46 32 24	6 26 35	594.256	768.373	768.373	1.114			-51.848	-56.522	-58.858	-62.828
63292	529		4	154128.6	523225.8	562.07	46 32 6	6 26 19	594.236	767.922	767.922	0.970			-51.651	-56.481	-58.893	-62.991
63275	530		4	154104.2	522915.8	585.17	46 32 2	6 26 4	589.141	767.817	767.817	1.277			-49.876	-55.166	-57.811	-62.305
63260	531		4	154724.3	522049.5	635.37	46 32 25	6 25 23	580.828	768.403	768.403	1.038			-49.888	-55.332	-58.052	-62.676
63271	532		4	154093.6	521447.1	655.85	46 32 4	6 24 55	575.763	767.877	767.877	1.196			-48.168	-53.731	-56.512	-61.236
63200	533		4	154222.7	520127.0	670.37	46 32 8	6 23 53	574.362	767.967	767.967	1.287			-44.771	-50.637	-53.645	-58.672
63234	534		4	154958.5	517621.0	714.94	46 32 31	6 21 55	568.393	768.538	768.538	1.668			-45.148	-51.026	-53.966	-58.960
63124	535		4	154556.2	517323.8	709.79	46 32 18	6 21 41	568.827	768.208	768.208	1.623			-43.721	-49.442	-52.303	-57.165
63232	536		4	154697.3	516600.8	692.90	46 32 22	6 21 8	573.788	768.313	768.313	1.868						

Fig. 20 Exemple de la sortie des résultats.

8.1. GÉNÉRALITÉS

Après l'exécution et la correction des mesures se posait à nous le problème de leur représentation et de leur élaboration graphique.

Une campagne gravimétrique d'une certaine extension nécessite le tracé de plusieurs dizaines de cartes, qui vont de la simple localisation des stations à l'interprétation graphique des résultats, en passant par toutes les cartes de BOUGUER pour les diverses densités choisies.

Devant l'ampleur du travail de dessin, nous avons tenté de l'automatiser dans la mesure du possible. Il s'agissait pour nous de gagner du temps et d'assurer à l'ensemble de notre étude et à d'éventuels travaux à venir une certaine homogénéité dans la précision du graphisme et dans le mode de représentation.

8.2. LA BASE GÉOGRAPHIQUE

A partir des cartes nationales au 1 : 25.000, nous avons digitalisé les frontières, les cours d'eau, le contour des lacs et l'emplacement de plus de 200 localités.

Ce travail a été possible grâce à l'utilisation, à l'Observatoire de Genève, d'un équipement composé d'une table de digitalisation (Follower pencil) D-MAC couplée à un ordinateur IBM 1620. L'ordinateur effectue la gestion de toutes les opérations d'acquisition, de stockage et de perforation des informations digitalisées. (Biblio 16)

Toutes les données relevées de la base géographique sont rassemblées dans un fichier sur bande magnétique.

8.3. LE RELEVÉ GRAPHIQUE DES RÉSULTATS

N'importe quelle donnée attachée à une station de mesure ou autre peut être représentée graphiquement et automatiquement à l'aide du traceur incrémentiel et digital BENSON par le truchement d'un programme NEWRELEV.

Ce traceur permet l'exécution de dessins d'une largeur utile de 74 cm. et d'une longueur illimitée, ainsi nos documents peuvent être réalisés directement à l'échelle des cartes topographiques. D'autre part, des héliographies peuvent être tirées directement grâce à la qualité du papier utilisé.

L'exécution d'une carte comprenant plus de 2000 stations dessinée à l'échelle de 1 : 50.000 avec mise en page, titres, repères kilométriques et fond géographique nécessite 70 minutes au "plotter" BENSON.

8.4. LE TRAÇAGE DES ISO-LIGNES

Le stade ultime de la représentation graphique de nos mesures est le tracé des courbes d'égales valeurs.

Pour qu'un procédé numérique et automatique de la recherche et le tracé des iso-lignes puisse être élaboré, il faut que les données soient disposées uniformément et systématiquement, suivant une grille carrée par exemple, sur toute la région. Il est rare que les données des stations de mesure soient établies selon un tel canevas, aussi est-il nécessaire de recourir à des méthodes numériques d'approximation pour transformer la disposition aléatoire des stations en une disposition uniforme.

Mais dans le cas de la représentation des résultats bruts, c'est-à-dire les anomalies de BOUGUER, cette façon de procéder n'est pas sans inconvénients car le caractère original de ces résultats est affecté par des anomalies parasites provoquées par les effets de tendances régionales développées par ces méthodes de transformation.

C'est pourquoi il nous faut être très prudent dans l'utilisation de ces transformations numériques.

Par contre, la représentation des surfaces de tendance (régionales) constitue une utilisation idéale de ce procédé de représentation graphique car ces surfaces peuvent être calculées en tous points.

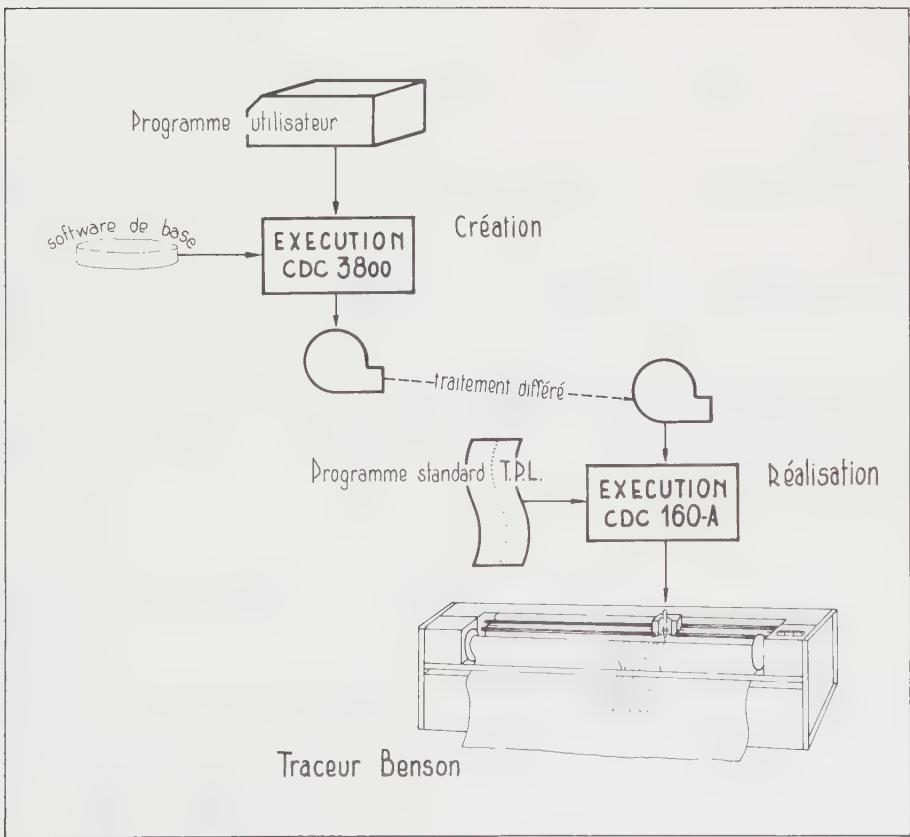


Fig. 21 Schéma de traitement de la représentation graphique par le truchement de l'ensemble CDC 3800, CDC 160 A et BENSON 1751.

Ce programme ISOVAL utilise le principe de recherche des iso-lignes qui nous a été aimablement fourni par le Centre d'Informatique Hospitalier de Ville-le-Juif et plus particulièrement par M. D. Bernard. Le principe d'ISOVAL est fondé sur l'interrogation constante de deux grilles virtuellement superposées représentant, l'une les valeurs numériques du champ à dessiner et l'autre l'état de la recherche de la courbe considérée.

La recherche des courbes est opérée par l'ordinateur CDC 3800, les résultats sont écrits sur une bande magnétique, la bande "plotter". Ultérieurement, ces informations sont reprises par l'ensemble CDC 160 A couplé au traceur digital qui dessine les courbes. (fig. 21)

CHAPITRE 9 – PRÉSENTATION DE QUELQUES RÉSULTATS

9.1. GRAVIMÉTRIE ET HYDROLOGIE

Le but premier de nos recherches était, nous l'avons dit, la mise en évidence des aquifères souterrains; en cours d'étude nous avons décidé de concentrer nos efforts sur l'élaboration des cartes gravimétriques. Cependant, avant de mettre un terme à ce travail, il paraît utile de montrer comment ces cartes gravimétriques permettent de déceler certains réservoirs dans le sous-sol.

Il se trouve que sur le plateau molassique, les principaux aquifères sont constitués par des sillons creusés dans la molasse et remplis de gravier. La molasse a une densité proche de 2,4, les graviers une densité proche de 2,2; les sillons doivent donc se marquer par des anomalies négatives. D'autre part, ces structures étant proches de la surface, elles doivent provoquer des anomalies à faible rayon de courbure.

9.2. L'EXAMEN DE DEUX CARTES DE BOUGUER

Avant de faire l'inventaire des anomalies négatives prometteuses, il convient de décrire rapidement certaines des cartes de BOUGUER que nous avons dressées (planches 1 - 4).

Examinons les cartes dessinées avec des densités de 2,40 et 2,67. La comparaison des deux figures permet de se faire une idée de l'importance du choix des densités.

On remarque, au premier abord, un vaste gradient régional, l'anomalie négative croissant rapidement en direction des Alpes. Les causes profondes de cette variation ne nous retiendront pas pour l'instant.

Cette pente générale est affectée par de nombreuses irrégularités tant négatives que positives. Ainsi, par exemple, à la hauteur de Bettens on peut remarquer une forte et vaste anomalie positive probablement d'origine profonde.

Pour trier les diverses anomalies et ne conserver que celles qui nous intéressent dans le cadre de cette étude, il est indispensable d'établir des cartes d'anomalies résiduelles.

9.3. LES CARTES D'ANOMALIES RÉSIDUELLES

On peut écrire:

$$\text{Anomalies de BOUGUER résiduelles} = \text{Anomalies de BOUGUER} - \text{Anomalies de BOUGUER régionales},$$

ou: $ABRES = AB - ABREG$

En principe, les anomalies régionales sont toutes celles qui n'ont pas d'intérêt pour une étude donnée alors que les résiduelles sont les anomalies recherchées.

LES ANOMALIES GRAVIFIQUES de Versoix à Concise

Anomalie de
BOUGUER
densité 2.20

cor. topo. 166 km.
base réf. Zürich 980667 mgls
équidistance 1.00 mgl.

Raymond Olivier 1972

0 2 4 6 8 km

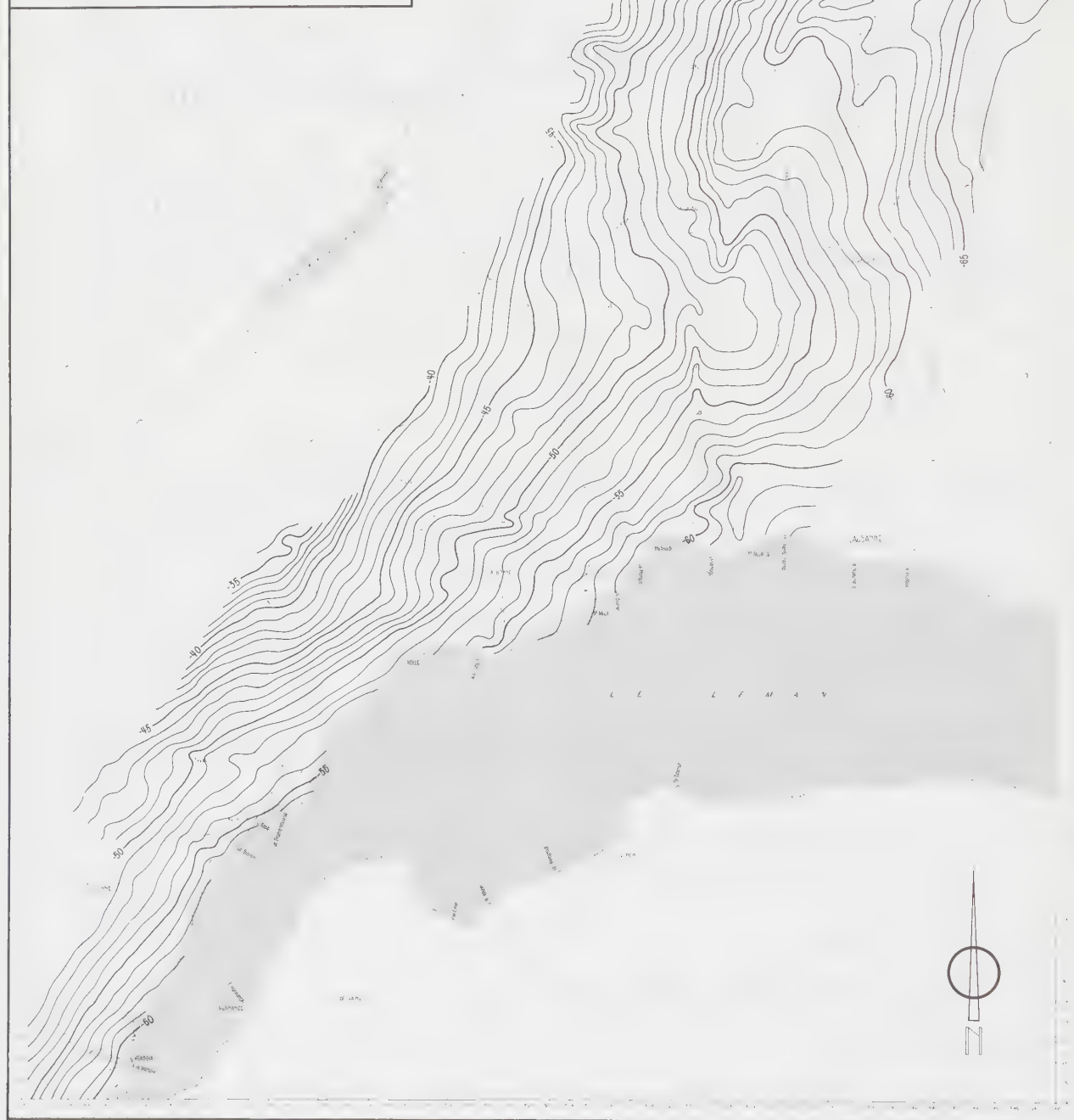


Planche 1 Carte de l'anomalie de Bouguer pour une densité de 2,20 et corrigée jusqu'à 166 km.

LES ANOMALIES GRAVIFIQUES de Versoix à Concise

Anomalie de
BOUGUER
densité 2.40

cor. topo. 166 km
base réf Zürich 980667 mgls
équidistance 1.00 mgl

Raymond Olivier 1972

0 2 4 6 8 km

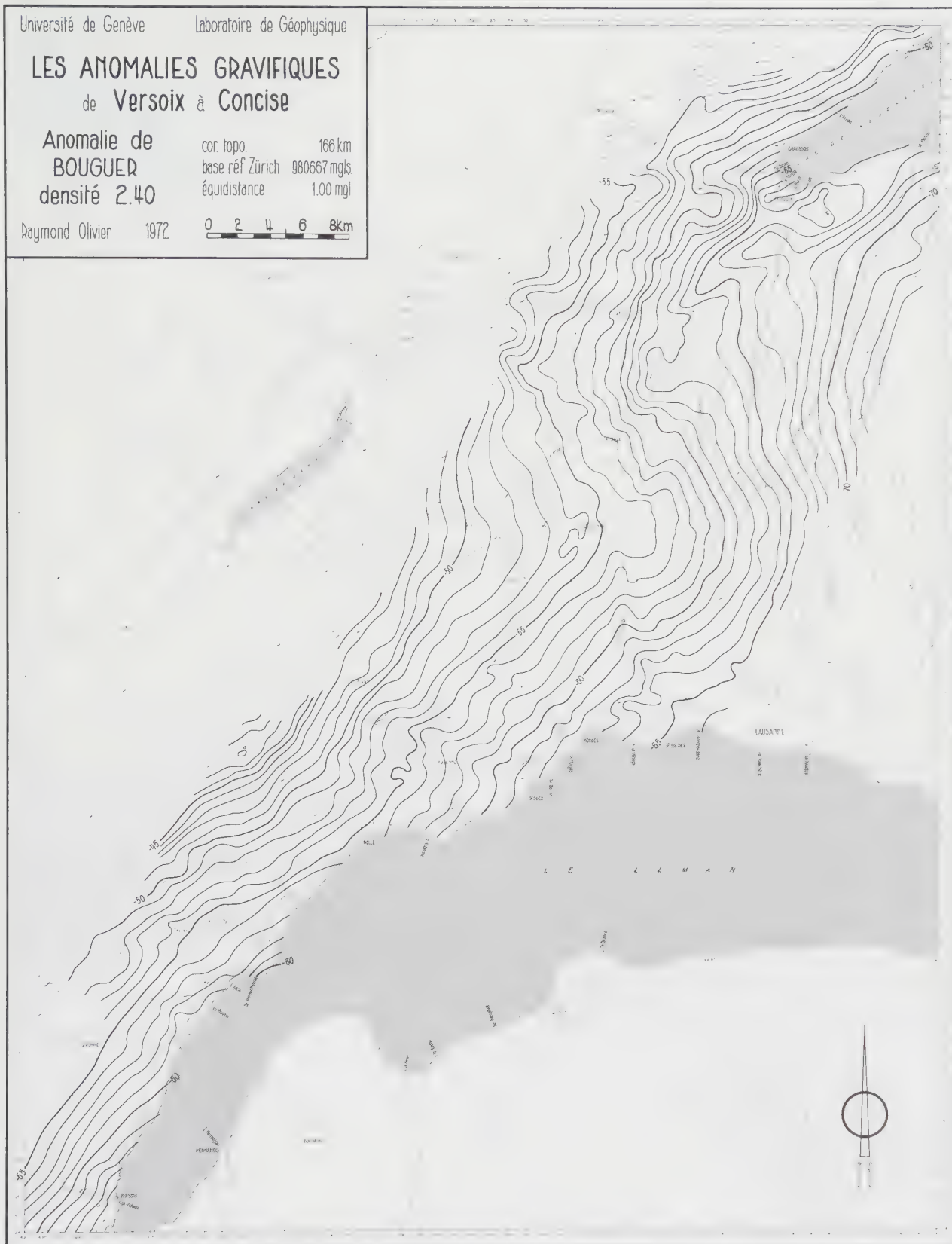


Planche 2 Carte de l'anomalie de Bouguer pour une densité 2,40 et corrigée jusqu'à 166 km.

LES ANOMALIES GRAVIFIQUES de Versoix à Concise

Anomalie de
BOUGUER
densité 2.50

cor. topo 166 km.
base réf. Zürich 980667 mgls
équidistance 1.00 mgl.

Raymond Olivier 1972

0 2 4 6 8 km

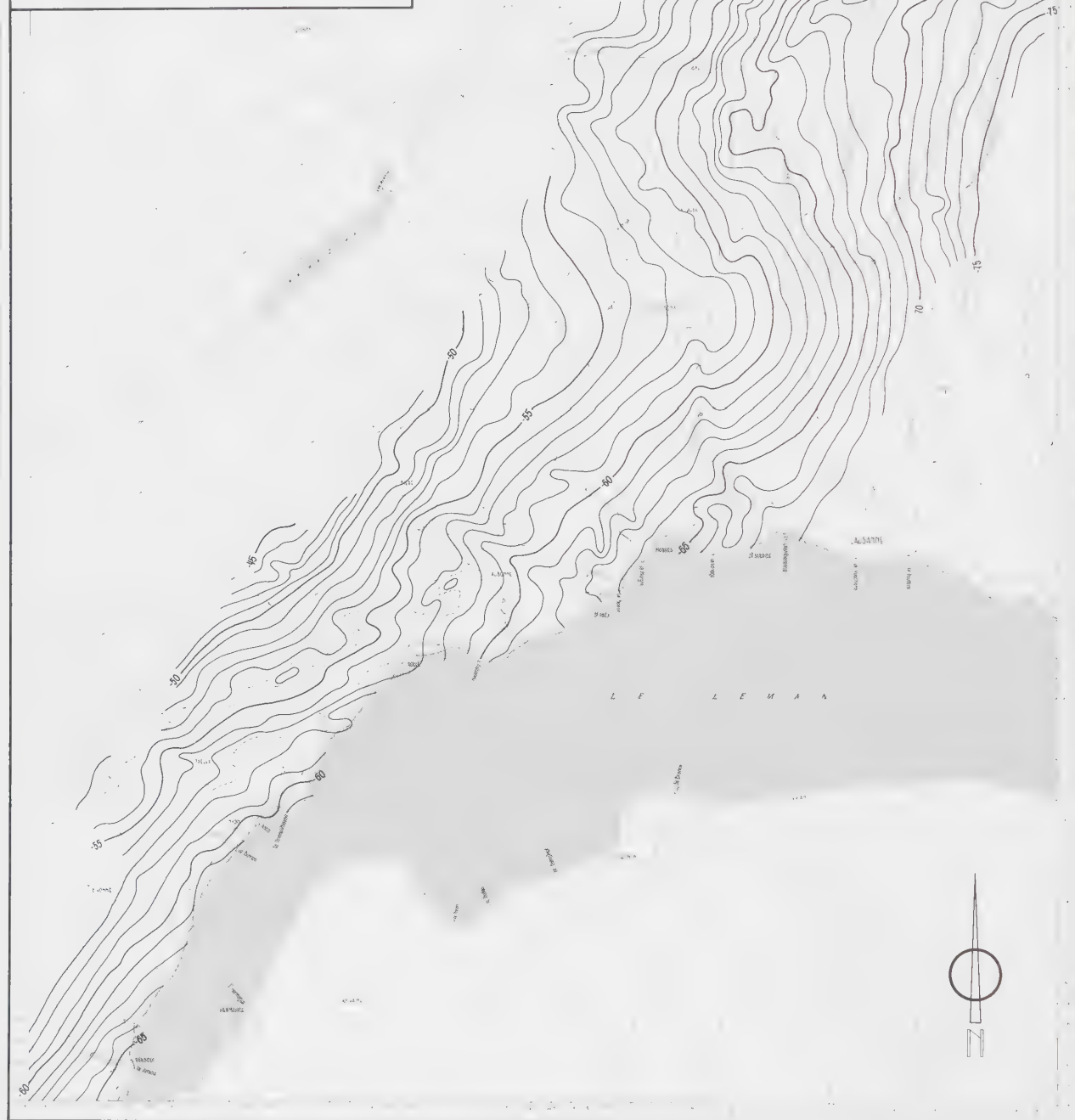


Planche 3 Carte de l'anomalie de Bouguer pour la densité 2,50 et corrigée jusqu'à 166 km.

LES ANOMALIES GRAVIFIQUES de Versoix à Concise

Anomalie de BOUGUER
densité 2.67
cor. topo. 166 km
base réf. Zürich 980667 mgls
équidistance 1.00 mgl

Raymond Olivier 1972

0 2 4 6 8 km

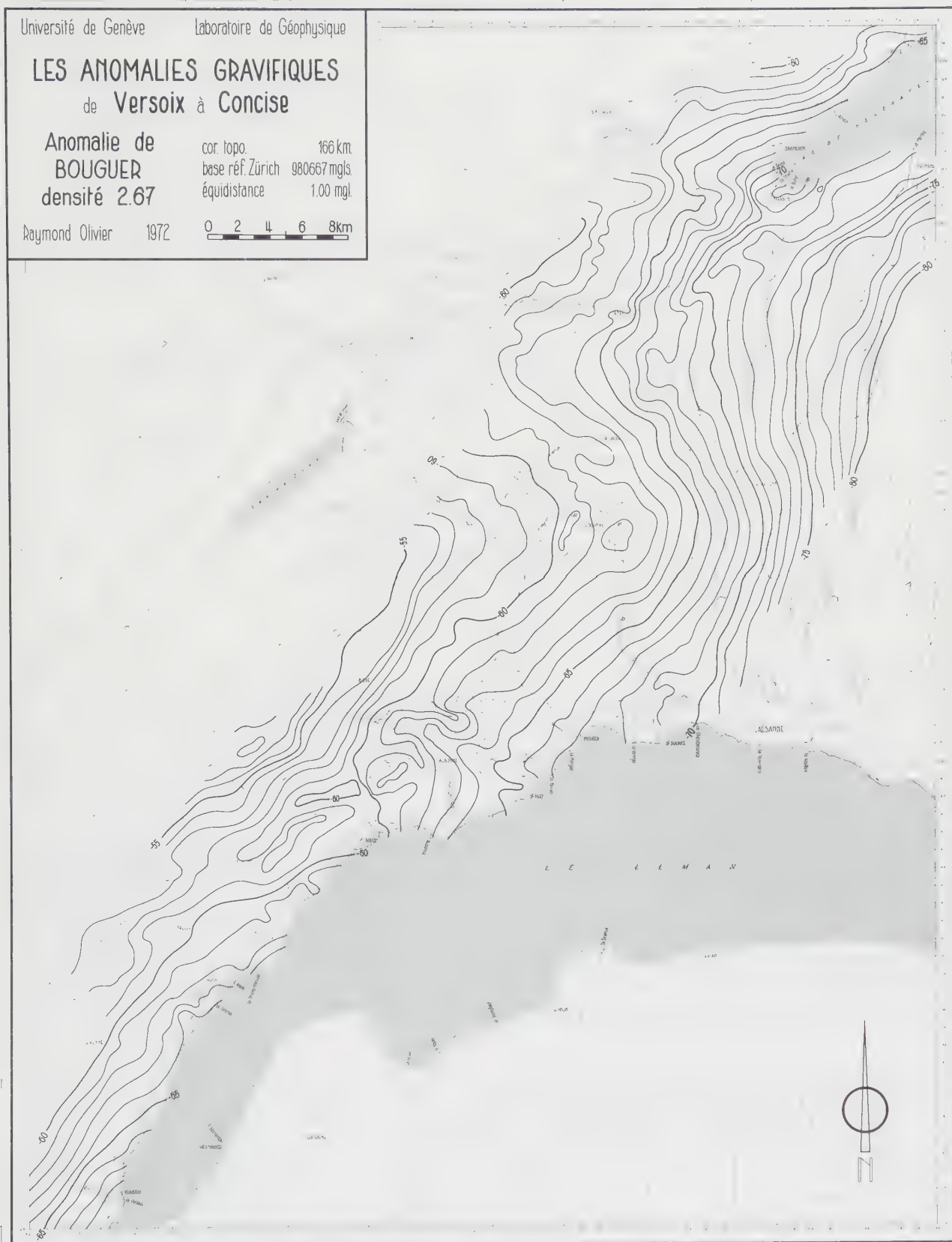


Planche 4 Carte de l'anomalie de Bouguer pour la densité de 2,67 et corrigée jusqu'à 166 km.

Dans le cas qui nous occupe, nous étudierons deux résiduelles, RES.A et RES.B (planches 6 et 8) obtenues grâce à deux régionales.

La première de ces régionales a été élaborée par “smoothing” manuel (planche 5), méthode qui laisse une large place au jugement de l’interprète pour le meilleur et pour le pire. La seconde régionale a été calculée par une analyse de Fourier (planche 7). Cette méthode est souvent qualifiée, un peu audacieusement, d’objective.

Les deux résiduelles obtenues, RES.A et RES.B sont analogues mais non identiques.

La RES.A fait apparaître des anomalies très localisées qui semblent toutes d’origine superficielle. Ce résultat était prévisible puisque la régionale manuelle a été choisie très proche de la carte de BOUGUER 2,40.

La RES.B, obtenue grâce à la régionale calculée, fait apparaître des structures un peu plus profondes. L’incorporation dans le calcul de résultats aimablement fournie par A. Donzé permet ici de mettre en évidence la structure du Petit-Lac.

9.4. LES PRINCIPALES ANOMALIES D’ORIGINE SUPERFICIELLE

Ces anomalies figurent sur la carte structurale ci-jointe, planche 9.

Du nord-est au sud-ouest on peut remarquer:

La tache négative du Concise

Cette tache est provoquée par une nette surépaisseur de quaternaire limitée à l’est et à l’ouest par la molasse et au nord par les calcaires du Jura. Il se peut que des failles à mouvements récents aient contribué à la formation de cette dépression.

L’axe négatif de la Brinaz

Cet axe négatif marque peut-être un ancien cours de la Brinaz, comblé par des dépôts meubles, cours qui pourrait d’ailleurs coïncider avec une faille dirigée de Sainte-Croix vers Les Esserts.

Le complexe positif Baulmes - Chamblon - Cuarny

Bien que positive, cette anomalie peut avoir un intérêt hydrologique puisqu’elle marque une remontée des calcaires faillés où chemine l’eau (Sources des Bains d’Yverdon).

Le complexe négatif de la plaine de l’Orbe

Ce complexe ne fait que souligner et préciser ce que l’on sait de la dépression de la plaine de l’Orbe entre Yverdon et l’étranglement du Mormont.

L’axe positif d’Orbe

Cet axe positif marque l’emplacement des calcaires d’Orbe, il nous en fait découvrir la prolongation vers l’est.

Les axes positifs d’Essertines, de Grancy, de Buchillon, St-Prex et de Messery

Tous ces axes positifs soulignent des anticlinaux profonds dont certains affectent la molasse surincombante mais dont aucun n’a d’intérêt immédiat pour l’hydrologue.

LES ANOMALIES GRAVIFIQUES de Versoix à Concise

RESIDUELLE "A"
par "SMOOTHING"
densité 2.40

cor topo 166 km
base réf. Zürich 980667 mgls
équidistance 0.25 mgl

Raymond Olivier 1972

0 2 4 6 8 km

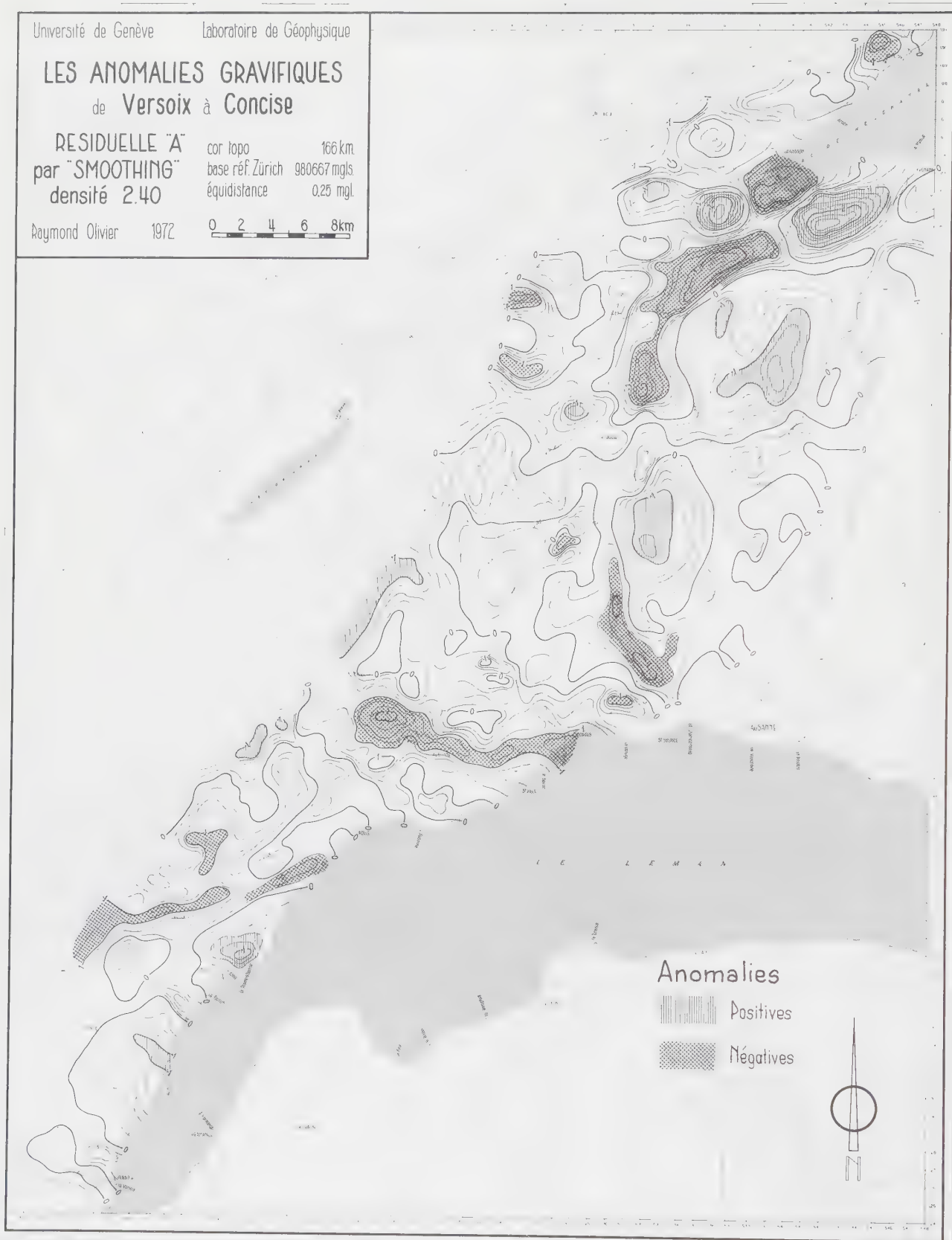


Planche 6 Carte de l'anomalie résiduelle gravifique "A" de densité 2,40 obtenue par la méthode de "smoothing".

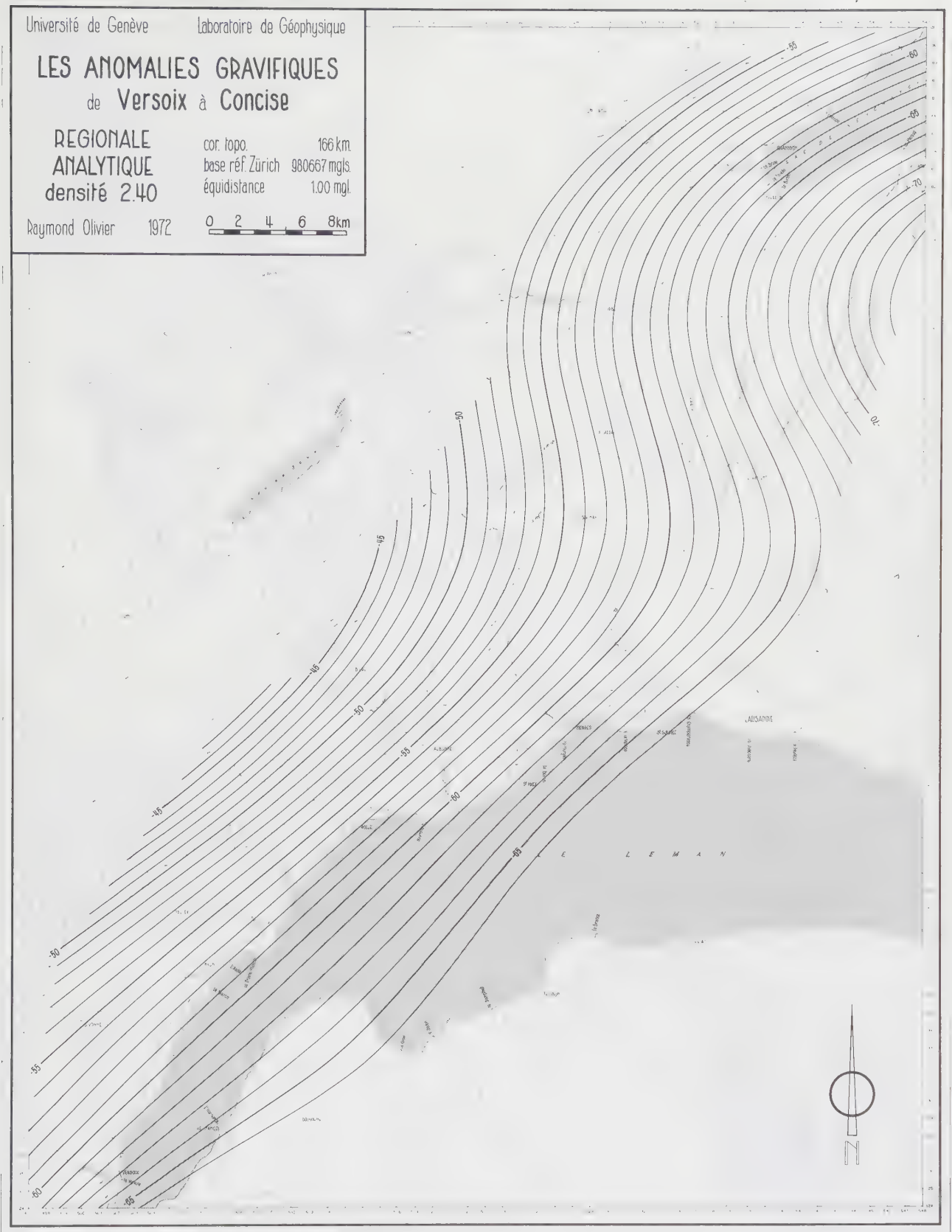


Planche 7 Carte de l'anomalie régionale gravifique de densité 2,40 calculée analytiquement par une analyse de Fourier.

LES ANOMALIES GRAVIFIQUES de Versoix à Concise

RESIDUELLE "B" cor topo. 166 km.
ANALYTIQUE base réf. Zürich 980667 mgls
densité 2.40 équidistance 0.25 mgl

Raymond Olivier 1972

0 2 4 6 8 km

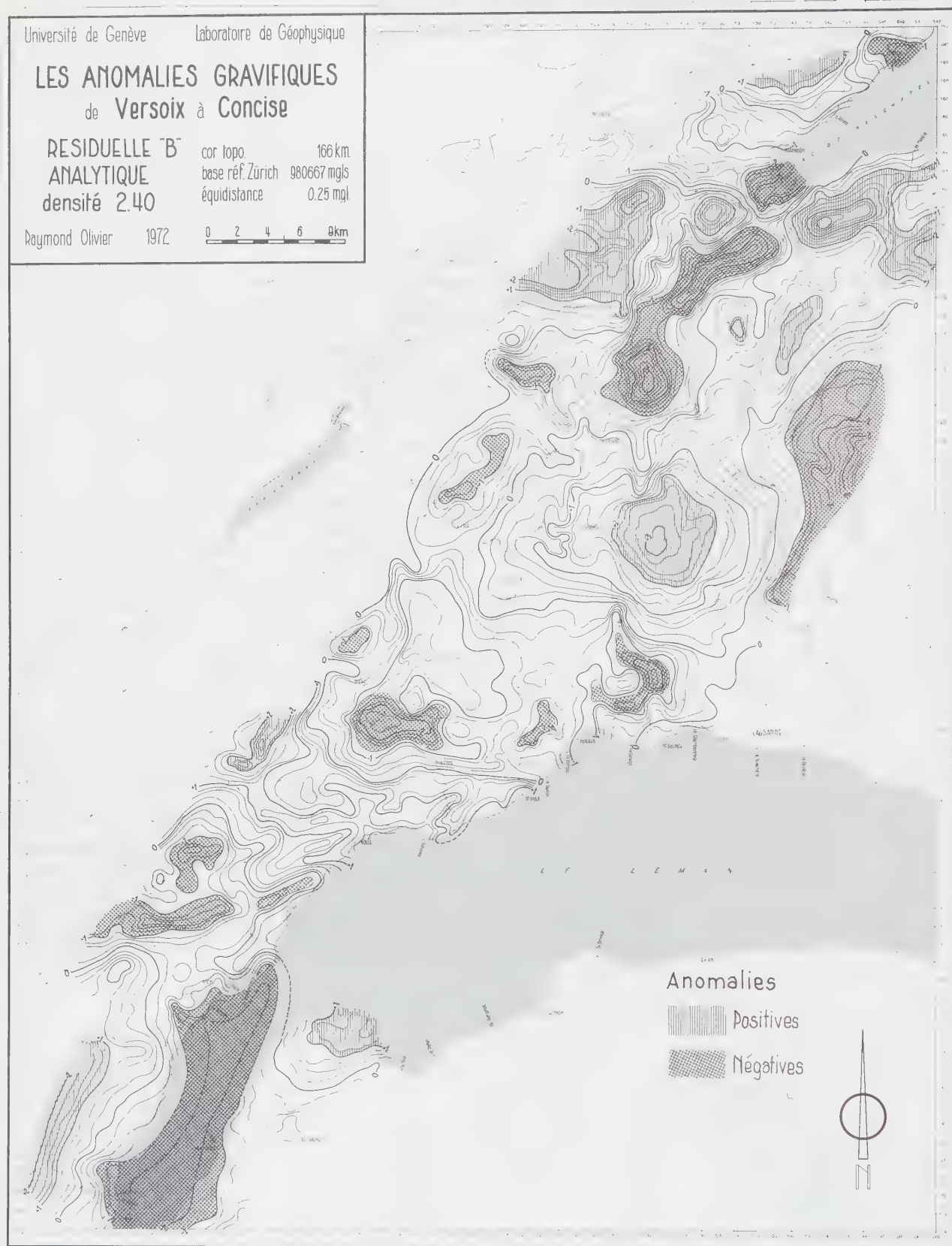


Planche 8 Carte de l'anomalie résiduelle gravifique "B" de densité 2,40 obtenue par analyse de Fourier.

L'axe négatif de la Venoge

Il s'agit d'une chaîne de petites anomalies négatives jalonnant un ancien cours de la Venoge, peu différent de l'actuel et, par conséquent, mal conservé.

L'axe négatif de l'Aubonne

Cet axe marque l'emplacement d'une Aubonne préglaciaire, comblée en partie de graviers et, par conséquent, d'un très vif intérêt hydrologique (Biblio. No 4).

L'axe négatif du Petit-Lac

Cet axe n'apparaît que sur la résiduelle RES.B; il est large et bien marqué puisque au devant de Crans on peut observer une anomalie de deux milligals. Une telle anomalie implique que le synclinal du Petit-Lac présente, en son centre, un creux de 150 ou 200 mètres, selon que l'on choisit 0,3 ou 0,5 comme contraste de densité entre le remplissage et les roches encaissantes.

L'axe négatif de Trélex (Nyon)

Cet axe révèle une ancienne vallée préglaciaire. Déjà les études électriques (Biblio. No 14) l'ont fait apparaître et son importance est telle qu'elle se poursuit au-delà des rives à Bursinel (Biblio. No 22).

Planche 10, la figure du haut nous précise son extension. Cette anomalie résiduelle est obtenue par "smoothing" et calculée avec une densité du sous-sol de 2,40.

Afin de montrer le parallélisme entre deux méthodes géophysiques, la figure du bas de la planche 10 nous donne le même sillon, mais cette fois-ci, mis en évidence par la méthode électrique (Biblio. No 14).

Etude gravimétrique du sillon de TRELEX (NYON)



Planche 10 Carte de l'anomalie résiduelle gravifique locale de TRELEX (Nyon) de densité 2,40.

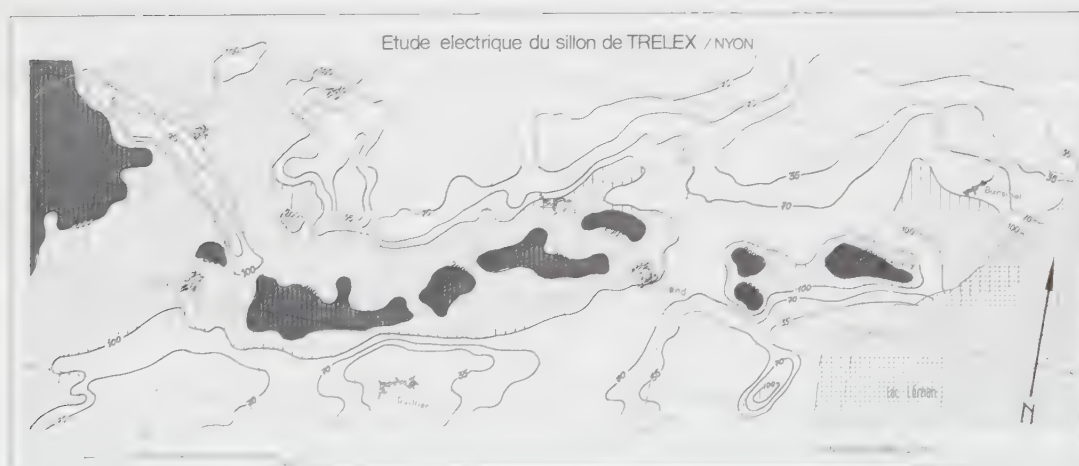


Planche 10 Carte de l'anomalie électrique du sillon de TRELEX (Nyon)

CONCLUSION

Le travail présenté dans ce résumé ne constitue qu'une étape vers le but que nous nous étions proposé tout d'abord et que nous espérons pouvoir poursuivre ultérieurement.

Tel qu'il est, ce travail apporte un certain nombre de résultats qui, nous l'espérons, pourront servir de diverses façons. Il nous semble, en effet, que l'établissement de la carte gravimétrique de la Suisse, projeté pour ces prochaines années, ne saurait se passer d'un système d'acquisition et d'élaboration des données par l'ordinateur.

Dans un autre ordre d'idée, nous croyons avoir montré, s'il en était encore besoin, à quel point les mesures gravimétriques peuvent servir aux recherches d'eau, comme elles ont servi aux recherches de pétrole et aux recherches de géologie générale.

REMERCIEMENTS

Il me faut, avant de terminer, exprimer mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé au cours de mon travail.

Ce sont tout d'abord mes camarades: Mmes M.C. Berney et D. Chapellier et MM. J.-P. Baud, R. Baud, H. Büchli, J.-M. Chenais, P. Corniche, P. Czegledi, G.-C. Favini, A. Jacquesson, E. Klingelé, R. Paquin, C. Pellegrini, F. Perret, R. Piguet, J.-J. Wagner et M. Wenger qui ont contribué dans une large mesure à son élaboration, et plus particulièrement M. A. Donzé avec lequel j'ai développé, au cours de ces deux dernières années, de nombreux programmes.

M. G. Moeckli, chargé de cours et programmeur de système au Centre Cantonal d'Informatique de Genève, de l'appui qu'il m'a généreusement donné tant pour la lecture optique que pour la gestion des fichiers.

M. J. Harms, professeur assistant à l'Institut Interfacultaire de Calcul Electronique de Genève qui m'a aidé de manière très efficace à l'emploi du système RAPROC, système d'accès aléatoire sur disque.

M. Schwab de l'Observatoire de Genève pour tous ses conseils désintéressés en matière d'utilisation du traceur de courbes BENSON.

M. Benaud du Service de la Recherche Sociologique à Genève pour son amabilité sans laquelle nous n'aurions pu utiliser librement le système CDC 160 A et le traceur BENSON durant de longues nuits et week-ends.

Mesdames les opératrices du "pool" de perforation du Centre Cantonal d'Informatique qui ont procédé à la perforation de plusieurs dizaines de milliers de cartes de notre fichier du relief topographique de la Suisse romande.

Messieurs les opérateurs de l'ordinateur CDC 3800 pour leur sympathique camaraderie durant de nombreuses heures de travail nocturne.

Pour terminer, il m'est très agréable d'exprimer ma gratitude envers mon épouse, ma mère et Mme M. Rohner qui ont participé à la mise au point et à la dactylographie de mon travail.

BIBLIOGRAPHIE

1. BOTT, M.H.P. (1959): The use of electronic digital computers for the calculation of gravimetric terrain corrections. *Geophys. Prospect.*, vol. 7, No 1, pp. 45-54.
2. BURRI, J.-P. (1967): Les anomalies gravifiques du nord-est du canton de Vaud. Travail de diplôme, Université de Genève.
3. CAVIN, D. (1970): Etude gravimétrique du Lavaux. Travail de diplôme, Université de Lausanne.
4. CORNICHE, P. (1973): Application des méthodes géophysiques à la recherche hydrogéologique. *Mat. pour la géologie de la Suisse, série Géophysique* No 13, 65 p.
5. CZEGLEDY, P.F. (1970): Quelques possibilités des méthodes objectives pour l'établissement des cartes en géophysique. Thèse de doctorat.
6. DONZÉ, A. (à paraître): Etude gravimétrique du Chablais français. Thèse de doctorat.
7. GONET, O. (1963): Les anomalies de la gravité dans le canton de Vaud. *Bull. Soc. Vaud. Sc. nat.* Vol. 68, No 311.
8. GONET, O. (1965): Etude gravimétrique de la plaine du Rhône — Région St-Maurice — Lac Léman. *Mat. pour la géologie de la Suisse, série Géophysique* No 6, 50 p.
9. HEISKANEN, W.A. (1953): Isostatic reductions of gravity anomalies by high-speed computing machines. *An. Acad. Scient. Fennicae, Helsinki, ser. A, sec. 3*, No 33, pp. 3-11.
10. KANE, M.F. (1962): A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer. *Geophys.*, vol. 27, No 4, pp. 455-462.
11. KLINGELÉ, E. (1972): Contribution à l'étude gravimétrique de la Suisse romande et des régions avoisinantes. *Mat. pour la géologie de la Suisse, série Géophysique* No 15, 94 p.
12. LAZREG, H. (1971): Etude géophysique, géologique et hydrogéologique de la région de Concise à Pompaples (Pied du Jura vaudois). *Mat. pour la géologie de la Suisse, série Géophysique* No 10, 50 p.
13. LEJAY, P. (1947): *Développements modernes de la gravimétrie*. Paris, Ed. Gauthier-Villars, 243 p.
14. MEYER DE STADELHOFEN, C. et Russy, C. (1973): *Atlas des résistivités électriques apparentes du Moyen-Pays vaudois*. Service cantonal vaudois de l'urbanisme.
15. NAGY, D. (1966): The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics* 31, pp. 362-371.
16. OLIVIER, R., VERY, J.-M., et VUAGNAT, P. (1970): Analyse statistique de micrographies digitalisées, appliquées aux parois de foraminifères porcelanés actuels. *Symposium international sur la biominéralisation*, Mayence, Allemagne fédérale.
17. OLIVIER, R. (1970): Projet d'une méthode numérique adaptée à la recherche de l'eau. *C.R. des Séances SPHN Genève, N.S. Vol. 5, fasc. 1* pp. 42-43.
18. OLIVIER, R. (1971): Digitalisation du relief de la Suisse romande. *Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles* Vol. 70, No 334.
19. PLOUFF, D. (1966): Digital terrain corrections based on geographic coordinates. Paper presented at the 36 Meeting of the Society of Exploration Geophysicists.

20. POLDINI, E. (1963): Les anomalies gravifiques du canton de Genève. Mat. pour la géologie de la Suisse, série géophysique No 4, 63 p.
21. ROMANESCO, A. (1967): Etude gravimétrique entre Aubonne – Rolle et Morges. Travail de diplôme, Université de Lausanne.
22. SIGRIST, W. (1974): Contribution à l'étude géophysique des fonds du lac Léman. Mat. pour la géologie de la Suisse, série Géophysique No 16.
23. WAGNER, J.-J. (1970): Elaboration d'une carte d'anomalie de BOUGUER et l'étude de la vallée du Rhône de St-Maurice à Saxon (Suisse). Mat. pour la géologie de la Suisse, série Géophysique No 9, 91 p.

